



Mariana Passeiro Ferreira

Licenciada em Ciências de Engenharia do Ambiente

**Contribuição da deteção remota para o
estudo da biomassa de pinhais na
Herdade da Apostiça (Sesimbra)**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente – Perfil de Sistemas Ambientais

Orientador: Professora Doutora Maria Teresa Calvão
Rodrigues, Professora Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António Manuel Fernandes Rodrigues

Arguente: Eng.º João Rui Dias Pinto Ribeiro

Vogal: Prof. Doutora Maria Teresa Calvão Rodrigues

Contribuição da deteção remota para o estudo da biomassa de pinhais na Herdade da Apostiça (Sesimbra)

© Copyright em nome de Mariana Passeiro Ferreira, da FCT e da UNL, 2019.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

“What lies before us and what lies behind us are small matters compared to what lies within us. And when we bring what is within out into the world, miracles happen.”

- Henry Thoreau -

“The greatest glory in living lies not in never falling but in rising every time we fall.”

- Nelson Mandela -

“Logic will get you from A to Z; imagination will get you everywhere.”

- Albert Einstein -

AGRADECIMENTOS

A realização e a entrega da presente dissertação representam o fechar do ciclo acadêmico do qual muito me orgulho de ter pertencido. Foi sem dúvida uma etapa crucial na minha vida, que me ajudou a expandir horizontes, ultrapassar novas barreiras e a moldar enquanto ser humano. O culminar de circunstâncias que me ajudaram a crescer, a desenvolver novas capacidades e a olhar o mundo com outros olhos.

Agradeço à minha simpática orientadora, Professora Maria Teresa Calvão Rodrigues pela enorme dedicação demonstrada durante a elaboração da minha dissertação, pela disponibilidade, pela orientação e pelo conhecimento e troca de ideias que sempre me foi transmitindo, com entusiasmo.

Agradeço à Eng.^a Fernanda Calvão Rodrigues, à Eng.^a Helena Santos e ao Eng.^o João Miguel Ribeiro pela amabilidade, disponibilidade, simpatia e preciosa ajuda relativamente ao trabalho de campo.

Agradeço ao Eng.^o João Silva por facilitar o estudo na Herdade da Apostiça e pela disponibilização de informação sobre a área em estudo.

Agradeço aos amigos que me ajudaram ao longo do curso e sobretudo nesta fase final, dando-me ânimo e apoio.

Agradeço sobretudo à minha família (pais, avós, irmã e sobrinha) por me ter permitido chegar até aqui, pela ajuda incondicional, pelo apoio à minha educação, pela força ao longo destes anos, pela disponibilidade e pelas traquinices que sempre me alegraram nas situações mais difíceis. Sem eles não teria sido, de todo, possível.

Dedico esta dissertação a vocês!

RESUMO

A deteção remota pretende obter informação à distância, sem que seja necessário contacto entre o alvo a estudar e o sensor. Este tipo de tecnologia tem aplicações variadas no estudo de muitos fenómenos, quer no meio aquático quer terrestre, e tem-se mostrado muito útil na monitorização e gestão de vários tipos de ecossistemas.

As florestas constituem importantes ecossistemas no planeta, tendo um papel essencial a nível biofísico, biogeoquímico, hidrológico, económico, cultural e climático. A biomassa é considerada um indicador chave nos processos ecológicos e climáticos. A quantificação da biomassa das árvores em ecossistemas florestais revela-se, desta forma, de um enorme interesse para a estimativa da produção primária líquida, da fixação de carbono, para o estudo do ciclo de nutrientes bem como *input* em modelos climáticos.

Escolheu-se como caso de estudo da presente dissertação a Herdade da Apostiça, na Península de Setúbal, zona ocupada, maioritariamente, por pinhais (essencialmente de Pinheiro-bravo), com composição e estrutura variada. Foram estudadas 17 parcelas, seleccionadas aleatoriamente, nas quais todas as árvores presentes foram medidas: diâmetro à Altura do peito e altura total da árvore. Com os valores destes parâmetros foi calculada a biomassa das árvores através de modelos alométricos desenvolvidos por outros autores para o Pinheiro-bravo e pinheiro-mansinho em povoamentos em Portugal. Foram utilizadas imagens *Sentinel 2B* do programa *Copernicus* com as quais foi desenvolvida a assinatura espectral e calculados vários (38) índices espectrais de vegetação.

Em seguida foram desenvolvidos modelos de regressão entre os valores da biomassa e os índices de vegetação. Os melhores modelos obtidos foram modelos lineares, que usam o DVI e o PVI ($R^2=0,78$ e $R^2=0,76$, respetivamente). Assim, apesar de algumas limitações, conseguiu-se demonstrar que técnicas de deteção remota são úteis na determinação da biomassa de povoamentos florestais, no presente caso, de pinhais.

Palavras-chave: biomassa, deteção remota, índices de vegetação, *Sentinel*, Sistema de Informação Geográfico, pinheiros.

ABSTRACT

Remote sensing techniques intend to obtain information from a distance, without requiring direct contact between the object to be studied and the sensor. This type of technology has varied applications in the study of many phenomena, both in the aquatic and terrestrial environment, and has been very useful in the monitoring and management of different types of ecosystems.

Forests are important ecosystems and play an essential role in biophysical, biogeochemical, hydrological, economic, cultural and climatic terms on a planet scale. Biomass is considered a key indicator in ecological and climatic processes. The quantification of the biomass of trees in forest ecosystems is therefore of great interest for the estimation of net primary production, carbon sequestration, for the study of the nutrient cycle.

Herdade da Apostiça, in the Setúbal Peninsula, was chosen as a case study in the context of the present thesis. This area is mainly occupied by pine forests (essentially Maritime pine), with varied composition and structure. Seventeen plots were randomly selected, in which all trees present were measured: diameter at breast height and total tree height. With the values of these parameters the biomass of the trees was calculated through allometric models developed by other authors for Maritime pine and Stone pine in stands in Portugal. *Sentinel* 2B images of the Copernicus program were used with which the spectral signature was developed and various (38) spectral indexes of vegetation were calculated.

Subsequently, regression models were developed between biomass values and vegetation indices. The best models obtained were linear models, using DVI and PVI ($R^2=0.78$ and $R^2=0.76$, respectively). Thus, despite some limitations, it was possible to demonstrate that remote detection techniques are useful in the determination of the biomass of forest stands, in the present case pine forests.

Keywords: biomass, Geographic Information System, pines, remote sensing, *Sentinel*, vegetation index.

A presente dissertação de mestrado foi desenvolvida no âmbito do projeto financiado por fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia, I. P., no âmbito projeto “*Alterações climáticas e seu impacto em florestas de pinheiro ao longo da costa oeste portuguesa: o caso de duas pragas recentemente emergidas*” (PTDC/BIA-ECO/31655/2017).

ÍNDICE DE MATÉRIAS

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contextualização:.....	1
1.1.1 Pinheiros em Portugal.....	2
1.2 Objetivo.....	8
1.3 Estrutura	8
2. DETEÇÃO REMOTA	9
2.1 Definição	9
2.2 Radiação eletromagnética	9
2.3 Interação com os objetos	10
2.4 Resolução dos sensores de deteção remota	12
2.5 Refletância e assinatura espectral	13
2.6 Programas espaciais mais importantes e respetivos satélites	15
2.7 Índices espectrais de Vegetação	21
2.8 Casos de estudo sobre florestas onde se utilizaram imagens <i>Sentinel 2</i>	27
3. METODOLOGIA	29
3.1 Área de estudo.....	29
3.2 Métodos	32
3.2.1 Identificação de áreas homogéneas e sua assinatura espectral	33
3.2.2 Amostragem no campo.....	34
3.2.3 Cálculo dos índices de vegetação	36
3.2.4 Cálculo da biomassa.....	38
3.2.5 Modelos de Regressão	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 Identificação de áreas homogéneas e sua assinatura espectral	43
4.2 Amostragem no campo	45

4.3 Cálculo de Índices de Vegetação.....	48
5. CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	55
5.1 Conclusões	55
5.1.1 Limitações do estudo	57
5.1.2 Recomendações e propostas futuras	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
ANEXOS	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Distribuição geográfica do Pinheiro-bravo	2
Figura 1.2 - Distribuição do Pinheiro-bravo em Portugal continental	3
Figura 1.3 - Distribuição geográfica do Pinheiro-manso	5
Figura 1.4 - Distribuição do Pinheiro-manso em Portugal continental	6
Figura 1.5 – Aspeto geral das árvores de (a) Pinheiro-bravo (b) Pinheiro-manso	7
Figura 2.1 - Bandas e comprimentos de onda do espectro eletromagnético ..	10
Figura 2.2 -Contribuição para que a radiação atinja um sensor espacial	11
Figura 2.3 - Alvos de superfície terrestre em deteção remota	14
Figura 3.1 - Localização da Herdade da Apostiça.....	29
Figura 3.2 - Diagrama termopluiométrico relativo a Setúbal (Normais Climatológicas 1951-1980).....	30
Figura 3.3 - Altitude da Herdade da Apostiça (aproximadamente 30 m de resolução espacial).	31
Figura 3.4 - Declive da Herdade da Apostiça (aproximadamente 30 m de resolução espacial). Mapa gerado a partir do <i>raster</i> da altitude, no <i>ArcMap</i> ...	31
Figura 3.5 - Esquema metodológico do presente trabalho	32
Figura 3.6 - Comparação das normais climatológicas com os dados obtidos do ano 2019: a) Temperatura; b) Precipitação	33
Figura 3.7 - Localização dos pontos de amostragem para determinação da biomassa.....	35
Figura 4.1 - Resultado da classificação <i>ISO Cluster Unsupervised Classification</i> da imagem de 3 de Maio	43
Figura 4.2 - Assinaturas espectrais referentes às 6 classes: 3 Maio, 30 de Maio e 21 de Agosto.	44
Figura 4.3 – Número de árvores amostradas por cada espécie para as várias parcelas.....	46
Figura 4.4 - Densidade das parcelas.....	47
Figura 4.5 - Biomassa das parcelas	47
Figura 4.6 - Relação entre (a) a biomassa de cada árvore e o seu DAP; (b) a biomassa e a altura, apenas para o Pinheiro-bravo	48

Figura 5.1 - Resumo das limitações observadas no âmbito do estudo	57
Figura 5.2 - Resumo das recomendações e propostas a desenvolver futuramente	57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 - Características do Pinheiro-bravo e do Pinheiro-manso	7
Tabela 2.1 - Primeiros lançamentos de satélites bem-sucedidos	16
Tabela 2.2 - Sensores mais usados, respetivos satélites e principais carateristicas	16
Tabela 2.3 - Resumo da missão <i>Sentinel</i>	19
Tabela 2.4 - Bandas espectrais captadas pelo sensor MSI incorporado nos satélites <i>Sentinel 2</i>	20
Tabela 3.1 - Índices espectrais de vegetação	36
Tabela 3.2 - Coeficientes de regressão para o Pinheiro-bravo	39
Tabela 3.3 - Coeficientes de regressão para o Pinheiro-manso	40
Tabela 3.4 - Coeficientes de regressão para o Sobreiro	40
Tabela 4.1 - Número total de árvores amostradas, por espécie.....	46
Tabela 4.2 - Valores dos índices espetais de vegetação para as parcelas.....	48
Tabela 4.3 - Valores do critério AIC para modelos lineares e não lineares.....	50
Tabela 4.4 - Valores do R^2 dos modelos lineares desenvolvidos.....	51
Tabela 4.5 - Tabela de validação e deteção de outliers para os modelos lineares com $R^2 > 0,6$. Todas as regressões são significativas a um nível de significância de 0.01.	52

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Índices

DVI	<i>Difference Vegetation Index</i> - Índice de Vegetação Diferenciado
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i> - Índice de Vegetação Aprimorado
GEMI	<i>Global Environmental Monitoring Index</i> - Índice Global de Monitorização Ambiental
GNDVI	<i>Green Normalized Difference Vegetation Index</i> - Índice de Vegetação Verde por Diferença Normalizada
LAI	<i>Leaf Area Index</i> - Índice de Área Foliar
MSAVI	<i>Modified Soil Adjusted Vegetation Index</i> - Índice de Vegetação Ajustado do Solo Modificado
MTVI	<i>Modified Triangular Vegetation Index</i>
NBR	<i>Normalized Burn Ratio</i>
NDII	<i>Normalized Difference Infrared Index</i> - Índice Infravermelho de Diferença Normalizada
NDMI	<i>Normalized Difference Moisture Index</i>
NDVCI	<i>Normalized Difference Vegetation Change Index</i> - Índice de Alteração da Vegetação por Diferença Normalizada
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> - Índice de Vegetação de Diferença Normalizada
OSAVI	<i>Optimized Soil Adjusted Vegetation Index</i> - Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Otimizado
PVI	<i>Perpendicular Vegetation Index</i> - Índice de Vegetação Perpendicular
RDVI	<i>Renormalized Difference Vegetation Index</i>
SAVI	<i>Soil Adjusted Vegetation Index</i> - Índice de Vegetação Ajustado ao Solo
TBWI	<i>The three-band water index</i>
TCARI	<i>Transformed Chlorophyll Absorption Refletance Index</i> - Índice de Refletância da Absorção de Clorofila Transformada
TSAVI	<i>Transformed Soil Adjusted Vegetation Index</i> - Índice de Vegetação Transformado do Solo Ajustado
WDRVI	<i>Wide Dynamic Range Vegetation Index</i>

Outras

AIC	<i>Akaike Information Criterion</i>
B i	banda i , $i=\{1,2,3,4,5,6,7,8,8a,9,10,11,12\}$
BLUE	banda azul no visível
C	circunferência da árvore expressa em cm a uma altura de 1,3 m do chão
C/A	banda do visível

CH₄	metano
CIRRUS	zona de nuvens
CO	monóxido de carbono
D	diâmetro da árvore expresso em cm a uma altura de 1,3 m do chão
DAP	diâmetro à altura de peito (1,3 m do chão)
DGT	Direção Geral do Território
ESA	<i>European Space Agency</i> - Agência Espacial Europeia
ESPA	<i>Center Science Processing Architecture</i>
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
FIR	<i>Fair infrared</i> - infravermelho distante
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GREEN	banda verde no visível
H	altura da árvore expressa em m
IPMA	Instituto Português do Mar e Atmosfera
IV	Índice(s) de Vegetação
LWIR	<i>Long Wavelength Infrared</i> - infravermelho de ondas longas
MSI	<i>MultiSpectral Instrument</i> - instrumento multiespectral
MSS	<i>Multispectral Scanner System</i> - Sistema de Scanner Multiespectral
MWIR	<i>Mid Wavelength Infrared</i> - infravermelho de ondas médias
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> - Administração Nacional Aeronáutica e Espacial
NIR	<i>Near Infrared</i> - infravermelho próximo
NO₂	dióxido de azoto
p	nível de significância
pan	pancromático
Past	Paleontological Statistics
PB	Pinheiro-bravo
PM	Pinheiro-manso
R²	coeficiente de determinação
RE	<i>Red Edge</i> - Região do vermelho
RED	banda do vermelho no visível
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SNAP	<i>Sentinel Application Platform</i>
SPOT	<i>Satellite Probatoire d'Observation de la Terre</i> - Satélite Probatório de Observação da Terra
SWIR	<i>Short Wavelength Infrared</i> - infravermelho de ondas curtas
TM	<i>Thematic Mapper</i>
VNIR	<i>Visible and Near Infrared</i>
VRE	<i>Vegetation Red Edge</i>

WV	zona de vapor de água: zona espectral onde a refletância aumenta abruptamente de vermelho para infravermelho
Y	biomassa expressa em kg
α	coeficiente com valor entre 0,1 e 0,2
β_j	coeficiente de regressão j , $j=\{1,2,3\}$
ρ	refletância espectral

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização:

A emergência para solucionar problemas relacionados com o ambiente levou à necessidade de desenvolvimento de novas técnicas para monitorizar os ecossistemas e responder, de forma eficaz, aos novos desafios (Demarchi et al., 2011). Para uma gestão adequada dos ecossistemas é essencial possuir um conhecimento atualizado e aprofundado da extensão, biomassa, e produtividade primária líquida das formações vegetais. Estimar a biomassa da vegetação nas diferentes fases de crescimento auxilia uma boa gestão agrícola/silvícola. No entanto, tal pode revelar-se complicado pois, ao longo do ciclo de vida de uma planta, a biomassa aumenta, estabilizando numa fase posterior. Além disso a razão entre a superfície ocupada pelos órgãos vegetais aumenta e a superfície de solo exposta diminui. No caso das plantas lenhosas a razão tecidos verdes/lenhosos varia nas várias fases de crescimento.

Uma vez que os métodos tradicionais de determinação daqueles parâmetros possuem várias limitações, por exemplo, são morosos e caros, foram desenvolvidos novos métodos, mais rápidos e eficazes, capazes de estimar de uma forma não destrutiva os parâmetros em causa (Cleveres, 1991). A deteção remota e os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm tido um papel essencial (Braz et al., 2015), possuindo muitas vantagens, nomeadamente a relação custo/benefício, a elevada resolução temporal e espacial. A informação recolhida por satélites permite o cálculo de índices espectrais denominados Índices Espectrais de Vegetação (diferença, soma ou outras combinações da refletância de bandas espectrais) que muitos estudos, em diferentes áreas do globo, têm revelado correlacionar-se com parâmetros importantes da vegetação como o grau de cobertura ou a densidade (Boratto & Gomide, 2013; Braz et al., 2015). Esta informação, além de permitir conhecer o estado fisiológico das formações vegetais, pode ajudar na sua gestão, como por exemplo na deteção de situações de défice hídrico, falta de nutrientes, muitas vezes quase em tempo real (Boratto & Gomide, 2013). De facto, o acesso às imagens de deteção remota encontra-se hoje muito facilitado, não só por meio da sua disponibilização gratuita como também de *software* para o seu tratamento. Por outro lado, a alta resolução quer temporal quer espacial potencializam a boa gestão dos recursos e facilitam na tomada de decisões (Walker, 2016).

As florestas possuem uma importância fulcral para a vida do nosso planeta, ocupando aproximadamente um terço das terras emersas. Estes ecossistemas contêm cerca de 80% da biomassa e 50 a 65% do carbono orgânico terrestre (incluindo o solo), constituindo um importante armazém e sumidouro de carbono. Além disso, são caracterizados por uma elevada diversidade. As florestas têm um papel essencial no planeta a nível biofísico, biogeoquímico, hidrológico, económico, cultural e climático (Santos Pereira, 2014 ; Reichstein & Carvalhais, 2019).

Os ecossistemas florestais fornecem inúmeros serviços, como por exemplo absorção de carbono, minoração do efeito de estufa, combate à erosão dos solos, conservação dos recursos hídricos e da biodiversidade (Groot et al., 2012). A quantificação da biomassa arbórea em

ecossistemas florestais tem, assim, uma enorme importância para a avaliação da produção primária líquida e armazenamento de carbono, para fins energéticos, para a estimativa da fixação de carbono, para o estudo do ciclo de nutrientes bem como *input* em modelos climáticos (Reichstein & Carvalhais, 2019). A biomassa é considerada um indicador chave nos estudos ecológicos e das alterações climáticas (Jin et al., 2019).

1.1.1 Pinheiros em Portugal

A importância da floresta e do sector florestal em Portugal é indiscutível. De fato a floresta ocupa uma extensão territorial elevada (cerca de 36% do território nacional), além de desempenhar um importante conjunto de funções (económicas, ambientais, sociais e culturais). Atualmente a espécie dominante é o eucalipto, que corresponde a 26% da área de floresta, o sobreiro é a segunda espécie (23%), seguido do Pinheiro-bravo (23%). O Pinheiro-mansinho corresponde a apenas 6% da área florestada (ICNF, 2015).

O Pinheiro-bravo (*Pinus pinaster* Aiton) distribui-se naturalmente na faixa Atlântica do sudoeste da Europa (Portugal, Espanha e França) e Mediterrâneo ocidental (Itália, Córsega, Sicília e Sardenha, Marrocos, Argélia e Tunísia) (Figura 1.1).

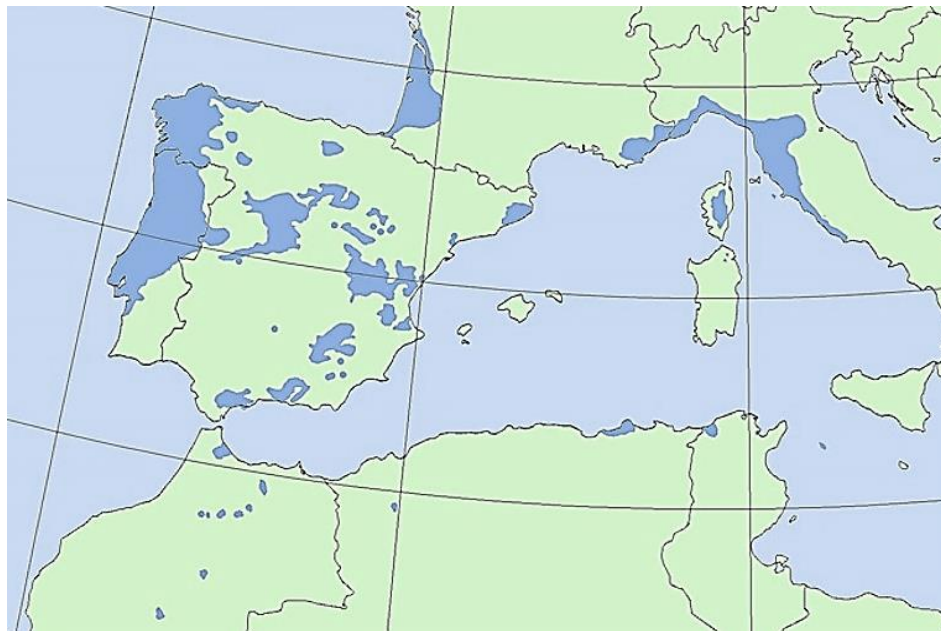


Figura 1.1 - Distribuição geográfica do Pinheiro-bravo [Alia & Martin, 2003]

A origem do Pinheiro-bravo no nosso país tem sido alvo de muita controvérsia. Alguns autores são da opinião de que esta espécie terá sido introduzida pelos romanos, outros que se terá expandido após a glaciação Würm, migrando de África (Figueiral, 1995). Contudo, os estudos mais recentes indicam que o Pinheiro-bravo é uma espécie arbórea nativa de Portugal continental, o que é comprovado, entre outros fatos, por estudos paleoecológicos. No entanto, a

sua área de distribuição atual (Figura 1.2) resulta fundamentalmente da ação humana, não só pela destruição das florestas naturais como por extensas arborizações com esta espécie (Prieto-Recio et al., 2015).

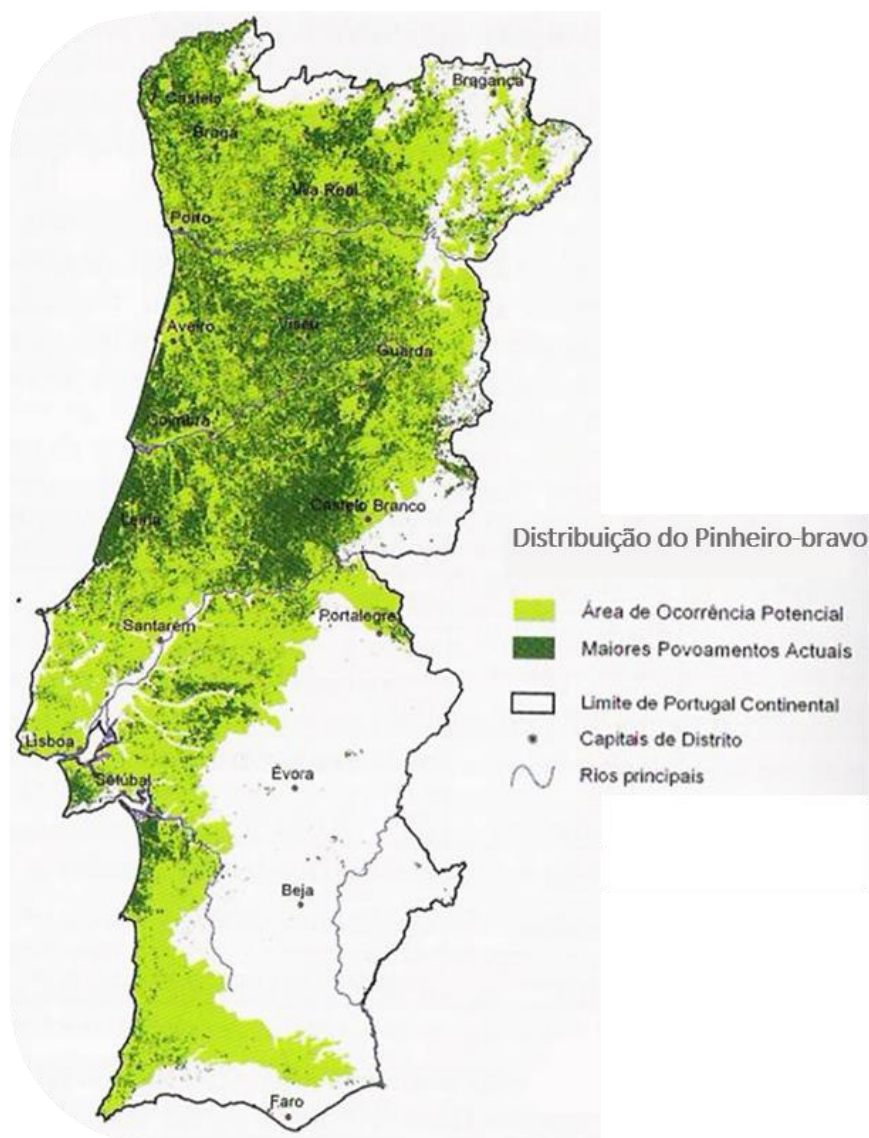


Figura 1.2 - Distribuição do Pinheiro-bravo em Portugal continental (Aguiar et al., 2007)

Nos últimos anos tem ocorrido uma tendência de declínio da floresta de Pinheiro-bravo como resultado de vários fatores, entre eles: incêndios, pragas e doenças provocadas por insetos e fungos. Alguns exemplos destes incidentes retirados do *site* do ICNF são:

- O cancro-resino-do-pinheiro é causado pelo fungo *Gibberella circinata* Nirenberg & O'Donnell. Esta espécie aloja-se preferencialmente em zonas que se encontrem partidas ou

fragmentadas por outros seres. A presença deste fungo pode causar exsudação abundante de resina no tronco, coloração amarelada/acastanhada nas agulhas da árvore e ainda criar lesões a nível do caule.

- A doença da marchidão do pinheiro é causada pelo nemátode da madeira do pinheiro (*Bursaphelenchus xylophilus* Steiner et Buhrer) Nickle cujo vetor é um inseto género *Monochamus*, mais concretamente *Monochamus galloprovincialis* (Olivier). O nemátode provoca, além da coloração amarelada das agulhas, uma diminuição de resina, a morte de bastantes folhas e ainda ramos secos e quebradiços. Na maior parte dos casos a árvore acaba por morrer. Esta doença é uma grande preocupação em Portugal, pelo que desde 2011 foram tomadas medidas obrigatórias a exercer aquando a presença da mesma: corte das árvores infetadas. O seu incumprimento, por parte dos proprietários pode levar a coimas entre 3 400 e 44 000 €.

- Outro inseto que provoca distúrbios nos pinheiros é a espécie *Leptoglossus occidentalis* Heidemann, conhecido pelo sugão do pinheiro. Esta espécie alimenta-se das agulhas dos pinheiros e, no caso Pinheiro-manso alimenta-se do seu fruto, o pinhão.

- Embora não crie uma grande preocupação, a Processionária-do-pinheiro ou Lagarta-do-pinheiro, como também é conhecida, é uma espécie de inseto nativa denominada *Thaumetopoea pityocampa* Schiff que faz os ninhos nas copas dos pinheiros. A preocupação maior existe na interação com humanos ou outros animais, uma vez as lagartas provocam urticária, podendo mesmo ser mortais quando ingeridas, por exemplo por cães.

Estes fenómenos colocam em risco a sustentabilidade da floresta. Uma das medidas que se tem revelado capaz de evitar a propagação de pragas é o abate imediato das árvores afetadas assim que apresentam os sintomas e sua supressão de forma segura (Gonçalves et al., 2017). Apesar deste declínio a Fileira do Pinheiro-bravo ainda possui uma enorme importância económica, social e ambiental para o nosso país, representando cerca de 17% do valor económico total da floresta de Portugal continental (Mendes, 2007). O material lenhoso desta espécie destina-se essencialmente às indústrias da pasta de papel e dos painéis de madeira, para serrações e ainda para lenha (Mendes, 2007).

O Pinheiro-manso (*Pinus pinea* L.) é originário do Mediterrâneo oriental (Península da Anatólia, Grécia e Síria). A partir desta zona espalhou-se pela Bacia Mediterrânica, atingindo algumas zonas à volta do Mar Negro e no Cáucaso (Fady et al., 2004, Costa, 2007) como se pode observar na Figura 1.3.



Figura 1.3 - Distribuição geográfica do Pinheiro-mansinho (Fady et al., 2004)

Os povoamentos de Pinheiro-mansinho na Península Ibérica representam aproximadamente 75% do total, estando, a maior parte situados em Espanha (ICNF, 2010). A sua origem no nosso país não é pacífica. Alguns autores acreditam que a espécie terá sido introduzida pelos romanos, gregos e fenícios, outros afirmam que se trata de uma espécie espontânea, especificamente nas zonas de areias a sul do Tejo (Costa, 2007). O Pinheiro-mansinho encontra-se bem adaptado ao clima mediterrânico (às altas temperaturas e défice hídrico durante o Verão), não vegetando bem com baixas temperaturas (Gonçalves & Pommerening, 2012). Esta espécie ocorre, preferencialmente, em solos arenosos, permeáveis e pobres em nutrientes (Costa, 2007). Os seus povoamentos têm maior expressão nas areias da Bacia Hidrográfica do Sado (Figura 1.4). O valor económico do Pinheiro-mansinho reside essencialmente no pinhão.

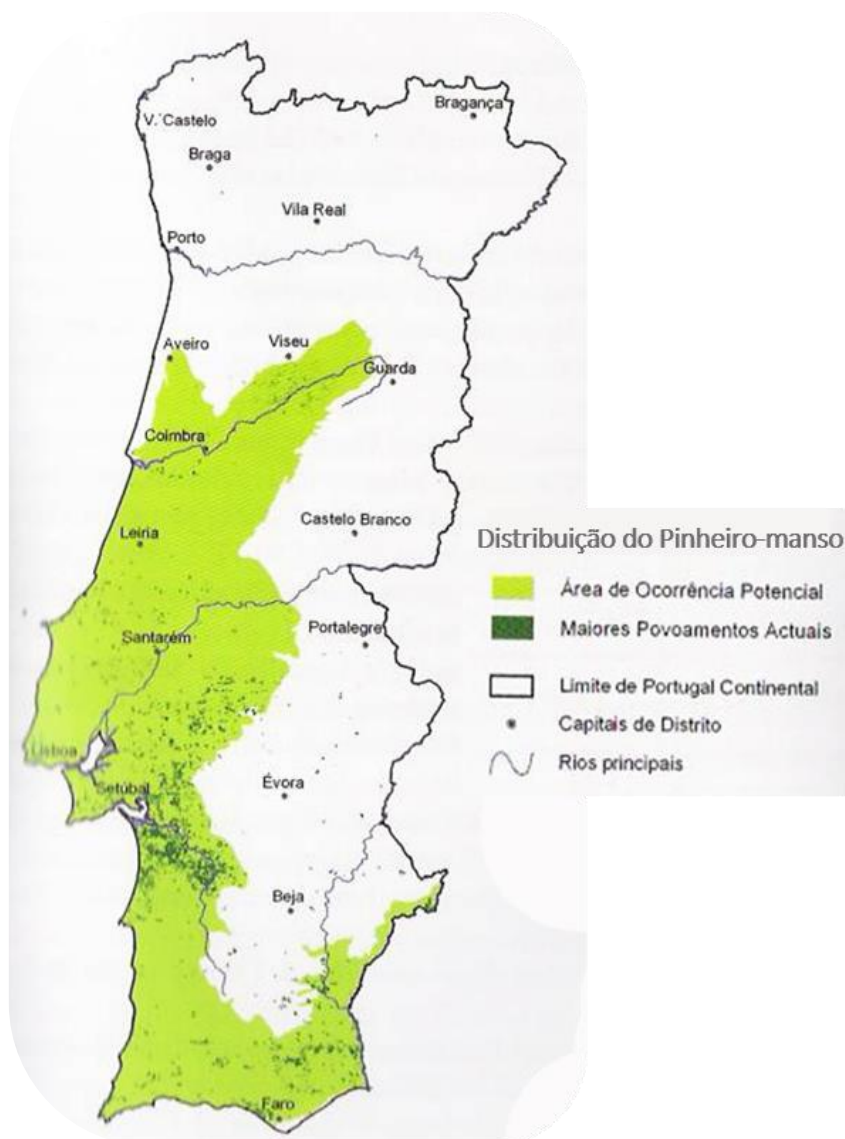


Figura 1.4 - Distribuição do Pinheiro-manso em Portugal continental (Aguilar et al., 2007)

Segundo Dias & Arroja, (2012), as sementes dos pinheiros, especialmente do Pinheiro-bravo são dispersas pelo vento e são resistentes ao fogo. Geralmente nas florestas de pinheiros coabitam outras espécies, como arbustos dos géneros *Cistus*, *Erica*, *Ulex*, *Lavandula*, *Rosmarinus officinalis*, *Thymus* e ainda gramíneas.

Na Figura 1.5 são apresentadas duas imagens referentes a ambas as espécies de pinheiros. A diferença, tanto a nível da copa como da rugosidade do tronco, é bastante notória. O Pinheiro-manso apresenta uma copa bastante mais densa e arredondada, comparativamente ao Pinheiro-bravo.



Figura 1.5 – Aspeto geral das árvores de (a) Pinheiro-bravo (b) Pinheiro-mansinho [Sociedade Portuguesa de Botânica, n.d]

A Tabela 1.1 apresenta algumas das principais características das duas espécies de pinheiros descritas (Silva, 2007).

Tabela 1.1 - Características do Pinheiro-bravo e do Pinheiro-mansinho (Correia et al., 2007; Silva, 2007)

Características	<i>Pinus pinaster</i> (Pinheiro-bravo)	<i>Pinus pinea</i> (Pinheiro-mansinho)
Altura máxima	~40 m (geralmente entre 20-25m)	~30 m
Idade máxima	~200 anos	~250 anos
Tipo de copa	Piramidal regular	Abobada, ampla e densa
Preferência de solos	Solos permeáveis, soltos e arenosos. Pouco exigentes quanto à nutrição mineral	Não compactados, arenosos, argilosos
Tipo de folha	Persistente acicular	
Clima	Temperatura Média Anual de 13-15°C; Precipitação Anual > 800 mm dos quais 100 mm na estação seca; espécie de luz; sensível a baixas temperaturas (< -15°C)	Necessita de luz ou meia luz, não tolera bem baixas temperaturas, tolera relativamente bem épocas de secas
Distribuição	Praticamente todo o país com exceção do Alentejo interior	Essencialmente nas areias da Bacia do Sado

Dada a importância ecológica, económica e social destas duas espécies de pinheiros no nosso país é de grande importância possuir métodos expeditos de monitorização da sua biomassa, produtividade e estado sanitário.

1.2 Objetivo

O presente estudo pretende examinar a possibilidade de determinação da biomassa de pinhais na Herdade da Apostiça, em Sesimbra, com recurso a imagens de satélite. Concretamente, pretende-se obter os melhores modelos de regressão entre dados dendrométricos obtidos no campo, e que possibilitam o cálculo da biomassa, com informação proveniente de satélites.

1.3 Estrutura

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos.

O primeiro capítulo – **INTRODUÇÃO (presente capítulo)** – é apresentado o enquadramento da dissertação, isto é, a problemática de determinação da biomassa de florestas através da utilização de técnicas de deteção remota.

O segundo capítulo – **DETEÇÃO REMOTA** – inclui uma breve revisão das propriedades da radiação eletromagnética mais importantes para uma melhor compreensão das técnicas referidas, um resumo das propriedades espectrais da vegetação mais relevantes para estudos de deteção remota. Descrevem-se, ainda, algumas características dos satélites e sensores mais utilizados em estudos de deteção remota do coberto vegetal. Por fim apresentam-se alguns dos índices de vegetação (IV) mais usados bem como os fatores que afetam, de uma forma mais significativa, esses índices.

No terceiro capítulo – **CASOS DE ESTUDO SEMELHANTES** – são apresentados 3 casos de estudo. Um realizado em contexto americano, outro europeu e um último africano.

No quarto capítulo – **METODOLOGIA** – é descrita a área de estudo e os métodos utilizados no respeitante ao trabalho de campo, tratamento das imagens e forma de os relacionar.

No quinto capítulo – **RESULTADOS E DISCUSSÃO** – são apresentados e descritos os principais resultados: caracterização das parcelas de estudo e modelos de regressão desenvolvidos.

No sexto capítulo – **CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS** – são apresentadas as principais conclusões, identificadas lacunas no trabalho desenvolvido e propostas formas de melhoria para trabalhos futuros.

2. DETEÇÃO REMOTA

2.1 Definição

Em meados da década de 60 terá surgido, pela primeira vez, o termo “*remote sensing*”, criado por Evelyn Pruitt, que usou esta designação para explicar a medição feita por meios indiretos, ou seja, sem que existisse contato direto entre o objeto ou fenómeno em estudo e o aparelho de medição (Emery & Camps, 2017b). Há, sim, uma interação energética entre o objeto e os sensores (Caeiro, 2015). A fonte de energia pode ser a luz solar ou radiação emitida pelo próprio aparelho de medição. Assim, pode definir-se deteção remota como a ciência de obter informação sobre a superfície da Terra sem entrar em contacto com ela.

Desde essa data foram desenvolvidos inúmeros sensores e plataformas para observação terrestre, o que permitiu a obtenção de uma vasta quantidade de dados, atualmente sendo alguns deles acessíveis em tempo real. Estes dados, juntamente com o apoio dos SIG, são um apoio essencial ao ordenamento do território, planeamento e monitorização do planeta (Caeiro, 2015; Emery & Camps, 2017b; Liang & Wang, 2012).

A associação entre deteção remota e as novas tecnologias geoespaciais resultam em vários benefícios: i) obtenção de imagens e vídeos de vastas áreas capazes de fornecer informação acerca da dinâmica do local (reconhecer padrões, interações e identificar objetos); ii) custos mais baixos na recolha de informação; iii) observações fora do observado pelo olho humano; iv) o cruzamento de informação ajuda na análise e mapeamento da zona em estudo; v) visualização retrospectiva da superfície do planeta (desenvolvimento de séries temporais); vi) monitorização, modelação ambiental e análise espacial (Klemas, 2009).

2.2 Radiação eletromagnética

O Sol constitui a principal fonte da energia que a Terra recebe. A energia emitida por esse astro é predominantemente da forma de energia radiante, de natureza eletromagnética e corpuscular. A energia ou radiação eletromagnética é uma forma de energia originada pela variação temporal de um campo elétrico ou magnético, propagando-se como ondas que oscilam numa direção perpendicular à direção do deslocamento, sem necessidade de um meio material de suporte (Emery & Camps, 2017a; Peixoto 1961).

Designa-se por espectro eletromagnético (Figura 2.1) a gama de comprimentos de onda da radiação eletromagnética. Geralmente o espectro é decomposto em várias regiões desde os raios gama, com baixo comprimento de onda, passando pelos raios X, ultravioleta, pela radiação do visível, pelo infravermelho, até aos maiores comprimentos de onda, as ondas de rádio Amorim (2015).

Os raios gama possuem comprimentos de onda pequenos, entre 10^{-14} m e 10^{-12} m. São caracterizados por alta energia (Sridharan, 2016). Os raios X têm comprimentos de onda entre 10^{-12} m a 10^{-8} m. Os comprimentos de onda referentes à radiação ultravioleta estão compreendidos entre 10^{-8} m e $3,8 \times 10^{-7}$ m. A radiação do visível tem comprimentos de onda entre $3,8 \times 10^{-7}$ m e $7,4 \times 10^{-7}$ m (Cristy et al., 2001). Esta banda é importante para a deteção

remota, uma vez que compreende os comprimentos de onda observáveis, a olho nu, pelo ser humano (Emery & Camps, 2017a). No visível é possível diferenciar 6 bandas: Violeta ($3,8 \times 10^{-7}$ m a $4,5 \times 10^{-7}$ m), Azul: ($4,5 \times 10^{-7}$ m a $4,95 \times 10^{-7}$ m), Verde: ($4,95 \times 10^{-7}$ m a $5,7 \times 10^{-7}$ m), Amarelo ($5,7 \times 10^{-7}$ m a $5,9 \times 10^{-7}$ m), Laranja ($5,9 \times 10^{-7}$ m a $6,2 \times 10^{-7}$ m) e Vermelho ($6,2 \times 10^{-7}$ m a $7,4 \times 10^{-7}$ m).

A radiação infravermelha possui comprimento de onda entre $7,4 \times 10^{-7}$ m e 10^{-4} m. Podem-se diferenciar várias zonas:

- Infravermelho próximo (*Near-infrared* - NIR): $7,4 \times 10^{-7}$ m a $1,4 \times 10^{-6}$ m;
- Infravermelho de ondas curtas – médio (*Short-wavelength infrared* - SWIR): $1,4 \times 10^{-6}$ m a 3×10^{-6} m;
- Infravermelho de ondas médias (*Mid-wavelength infrared* - MWIR): $2,5 \times 10^{-6}$ m a 5×10^{-6} m (3×10^{-6} m a 8×10^{-6} m);
- Infravermelho de ondas longas – termal (*Long-wavelength infrared* - LWIR): 8×10^{-6} m a $1,5 \times 10^{-5}$ m;
- Infravermelho distante (*Far-infrared* - FIR): $1,5 \times 10^{-5}$ m a 10^{-4} m.

As Micro-ondas têm comprimentos de onda compreendidos entre 10^{-4} m a 1 m. A zona espectral com radiação de maiores comprimentos de onda e, conseqüentemente, menor energia, corresponde às ondas de rádio. Esta banda possui comprimentos de onda na ordem de 1 m a 10^6 m.

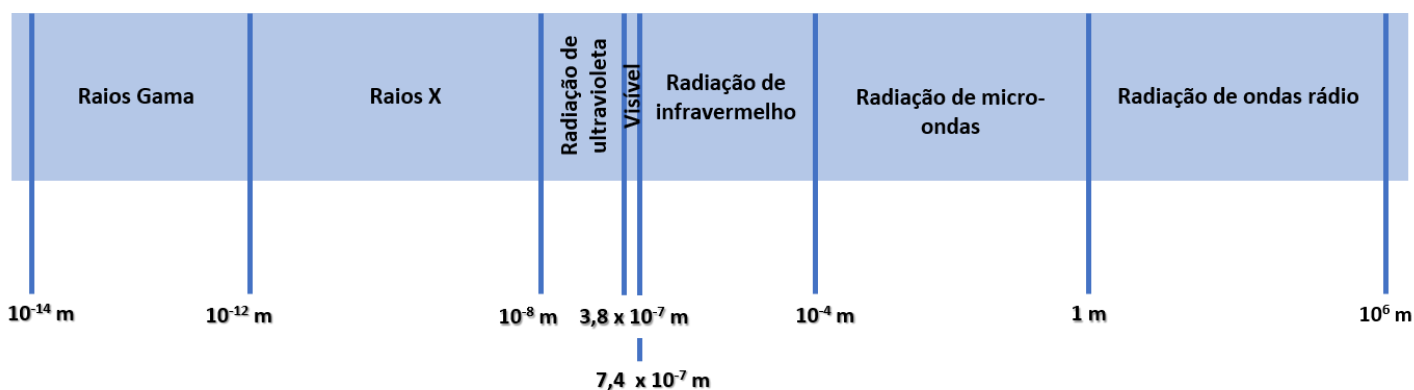


Figura 2.1 - Bandas e comprimentos de onda do espectro eletromagnético [Adaptado de Emery & Camps, 2017; Sridharan, 2016; Klemas, 2009]

2.3 Interação com os objetos

Quando a radiação eletromagnética incide nos corpos podem ocorrer várias interações, interações estas que produzem alterações nas características da radiação: mudanças de magnitude, direção, comprimento de onda, polarização e fase. As interações dependem das características do objeto em causa.

As possíveis interações entre a matéria e a radiação eletromagnética são: transmissão, absorção, reflexão, difusão e emissão.

A radiação solar, antes de atingir a superfície terrestre, atravessa a atmosfera que envolve o planeta, havendo absorção de cerca de 20% da radiação pelos constituintes da atmosfera (Amorim, 2015). Por outro lado, os objetos refletem a radiação solar, que terá, por sua vez, de atravessar a atmosfera antes de atingir o sensor. Ou seja, há uma perturbação que interfere com a observação de atributos da superfície da Terra, resultante da presença da atmosfera (Figura 2.2).

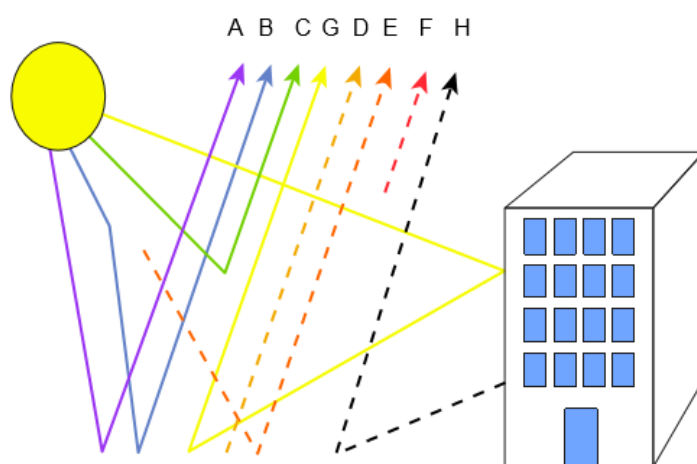


Figura 2.2 -Contribuição para que a radiação atinja um sensor espacial (Emery & Camps, 2017a)]

- (A) Irradiação solar transmitida através da atmosfera e refletida pela superfície da Terra (dia claro)
- (B) Radiação solar difundida pela atmosfera refletida pela superfície da Terra (dia nublado ou com nevoeiro)
- (C) Radiação solar de *upwelling* difundida pela atmosfera (múltiplas reflexões)
- (D) Emissão térmica espontânea da superfície da Terra
- (E) Radiação atmosférica *downwelling* (emissão espontânea) refletida na superfície da Terra
- (F) Radiação atmosférica de subida (emissão espontânea)
- (G) Irradiação solar refletida que atinge o sensor através de dispersão múltipla
- (H) Emissão térmica espontânea de corpos atingindo o sensor através de múltiplos espalhamento

Como os gases atmosféricos absorvem, com diferente intensidade, a radiação dos diferentes comprimentos de onda, influenciam quais as regiões do espectro passíveis de serem usadas em detecção remota. As regiões do espectro eletromagnético que não são muito influenciadas pela absorção atmosférica designam-se por “janelas atmosféricas” e são, portanto, úteis para a detecção remota.

A atmosfera absorve a maior parte da radiação de comprimento de onda mais curto, radiações nocivas para o Homem, animais e plantas (principalmente as mais curtas, como os raios gama, os raios X e os ultravioletas), permitindo a existência de vida na Terra. A atmosfera é praticamente “transparente” para a radiação do visível. A radiação da região do infravermelho

é muito absorvida pela atmosfera. Pelo contrário, na região das micro-ondas ocorre uma “janela atmosférica”, ou seja, ocorre pouca absorção (Emery & Camps, 2017a). O efeito de absorção da radiação solar pela atmosfera pode ser diminuído escolhendo regiões espectrais não afetadas por este fenómeno.

O fenómeno da difusão ocorre quando partículas ou moléculas gasosas presentes na atmosfera interagem com a radiação eletromagnética, fazendo com que esta seja desviada da sua trajetória original, em várias direções. A difusão não ocorre de igual forma para todos os comprimentos de onda. No visível afeta com maior intensidade a região do azul. O efeito deste fenómeno é muito mais difícil de evitar, em comparação com o da absorção. Assim, encontra-se presente em qualquer imagem adquirida por deteção remota.

2.4 Resolução dos sensores de deteção remota

As características de um sensor envolvem geralmente quatro domínios no que respeita à resolução: resolução espacial, espectral, temporal e radiométrica.

A resolução espacial diz respeito à capacidade que o sensor tem em distinguir objetos na superfície da Terra: a resolução é tanto maior quanto menor for o objeto passível de ser identificado. A resolução espacial depende fundamentalmente da dimensão do pixel (Amorim, 2015). Esta é uma característica muito importante, pois quanto melhor for a resolução, maior será a capacidade do sensor em distinguir objetos próximos.

Os sensores variam no respeitante à resolução espacial: baixa, na ordem dos quilómetros (em estudos globais como é o caso da meteorologia); média-alta, com valores entre dezenas a centenas de metros; e muito alta, no caso de valores inferiores a 5 metros (nível de pormenor bastante bom). As missões *Landsat* são missões de média resolução espacial enquanto que as missões SPOT (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*) e *RapidEye* são missões de elevada resolução espacial.

A resolução temporal corresponde ao tempo que o satélite leva para voltar a adquirir imagens da mesma área e depende de vários parâmetros como características da órbita do satélite e do sensor (Chuvienco, 1995). Por exemplo, o satélite *Landsat* adquire imagens da mesma área todos os 16 dias, o SPOT todos os 3 dias.

A resolução espectral de um sensor consiste na sua capacidade em diferenciar intervalos de comprimentos de onda diferentes. Quanto melhor a resolução espectral, mais estreito será o intervalo de comprimento de onda para uma determinada banda ou canal. A resolução espectral envolve o número de bandas, a largura das bandas e a posição das bandas no espectro eletromagnético (Amorim, 2015). Os sensores distinguem-se quanto ao número de bandas espectrais que conseguem detetar: monoespectrais, quando utilizam somente uma banda; ii) multiespectrais, quando conseguem utilizar no máximo 10 bandas; iii) superespectrais, quando captam mais de 10 bandas e iv) hiperespectrais, quando ultrapassam as 100 bandas (Amorim, 2015).

Os sensores hiperespectrais têm vindo a ser cada vez mais explorados. Este tipo de sensores fornece imagens extremamente complexas, tendo sido desenvolvidas técnicas de

processamento de análise avançadas para o tratamento das imagens que obtêm (Kanjir et al., 2018).

A resolução radiométrica corresponde à capacidade do sensor em detetar variações do nível de radiação incidente. A radiação solar refletida pelos objetos, ao atingir os sensores, é convertida num sinal eletrónico que, por sua vez, é transformado num sinal digital. Ou seja, a radiância incidente é transformada num número inteiro sem dimensões, designado por intensidade de brilho. Quantos mais níveis o sensor conseguir captar, melhor o detalhe da imagem (Amorim, 2015). A intensidade de brilho exprime-se em *bits*, ou seja, em termos do número de dígitos binários necessários para guardar, em forma digital, o valor do nível máximo.

Nos primeiros sensores a intensidade de brilho situava-se, geralmente, na escala 0 - 255 (níveis de cinza), o que corresponde a 8-*bits* de resolução radiométrica. A resolução radiométrica do sensor *MultiSpectral Instrument* (MSI) a bordo da Missão *Sentinel 2A* e 2B é de 12-*bits*, o que permite a obtenção de uma gama de valores de 0 a 4 095 de intensidade de brilho (Bonansea et al., 2019). O sensor *Hyperion* tem 16-bits (0 - 65 536 níveis de cinza) de resolução radiométrica (Hu et al., 2018).

2.5 Refletância e assinatura espectral

A refletância consiste na razão entre a energia refletida (e medida pelos sensores instalados em satélites) e a energia incidente num determinado objeto. Este parâmetro varia em função do ângulo de incidência da luz, assim como das características dos objetos. Os valores da refletância nas várias regiões do espectro eletromagnético possibilitam a elaboração da curva de refletância espectral ou assinatura espectral desse objeto. As assinaturas espetrais dão informação importante sobre os objetos, uma vez que traduzem a sua interação com a radiação solar (Amorim, 2015).

Os elementos da paisagem apresentam diferentes refletâncias nas diferentes regiões do espectro eletromagnético (Figura 2.3). A assinatura espectral dos solos é geralmente simples. A refletância aumenta em função do comprimento de onda na região do visível e do infravermelho próximo, sendo mais variável no infravermelho médio devido à absorção da radiação solar pela água contida no solo (Demattê et al., 2019).

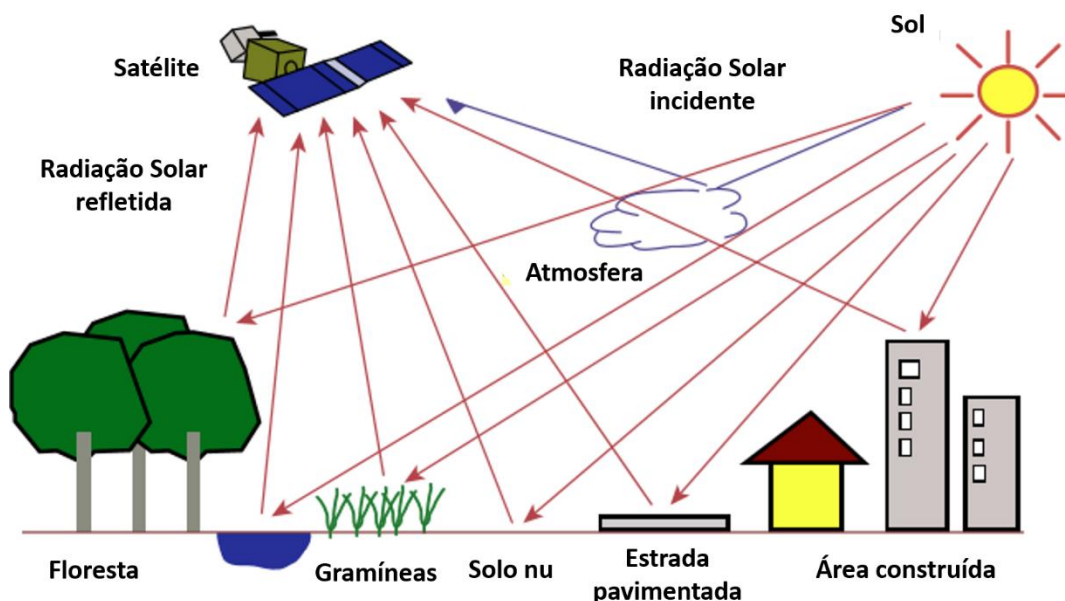


Figura 2.3 - Alvos de superfície terrestre em detecção remota [adaptado de Emery & Camps (2017b)]

A água é caracterizada por absorver a maior parte da radiação incidente. A refletância apresenta o máximo na região espectral do azul. A partir desta região espectral a radiação é praticamente toda absorvida (Hoffer & Johannsen, 1969).

A assinatura espectral da vegetação fotossinteticamente ativa é mais complexa, dependente do comprimento de onda. A vegetação possui baixos valores da refletância na região espectral do visível, elevados valores no infravermelho próximo e um comportamento variável no infravermelho médio (Hoffer & Johannsen, 1969). Os pigmentos fotossintéticos são responsáveis pela resposta espectral da vegetação na região do visível, a estrutura interna das folhas e o seu teor em água no infravermelho próximo e a água presente nos tecidos foliares no infravermelho médio (Hoffer, 1978). Verifica-se a ocorrência de um pequeno pico de refletância na região do verde, que confere a cor verde à vegetação saudável.

As clorofilas absorvem grande parte da radiação do visível, sobretudo dos comprimentos de onda referentes ao azul (430 nm) e vermelho (660 nm), o que implica baixos valores da refletância nestas bandas espectrais (Lira et al., 2011). Os elevados valores da refletância no infravermelho próximo devem-se a fenômenos de reflexão múltipla da radiação na estrutura interna das folhas (Barrett & Curtis, 1982, Hoffer, 1978).

O *Red Edge* (RE) consiste numa variação brusca da refletância entre o visível e o infravermelho próximo e é uma característica única da vegetação fotossinteticamente ativa. Este fenômeno resulta da elevada difusão da radiação na estrutura interna nas folhas. A posição do RE é muito sensível à situação fisiológica da vegetação, sendo, assim, muito útil na monitorização das comunidades vegetais.

A refletância no infravermelho próximo varia consoante a estrutura celular das folhas. Plantas com folhas com paredes celulares espessas e folhas compactas têm baixa refletância no infravermelho próximo comparativamente a plantas com paredes celulares menos espessas e folhas menos compactas. Isto deve-se ao facto de existir menos oportunidade de difusão da

radiação tanto no interior da estrutura foliar como dentro das células. É possível determinar, através da assinatura espectral, o teor de água presente nos tecidos foliares de uma planta (Tehrany et al., 2017).

No infravermelho médio a refletância é inferior à do infravermelho próximo. Nesta região espectral as interações estão sob controle, essencialmente, da água dos tecidos foliares e, em menor grau, da estrutura interna da folha.

A radiação do infravermelho térmico também pode ser usada para determinar o estado hídrico da vegetação, na medida em que é muito sensível ao comportamento estomático que, por sua vez, responde ao *stress* hídrico das plantas (Houborg et al., 2015).

A assinatura espectral da vegetação pode ser usada para avaliar o seu estado fisiológico. De facto, quando há perda das funções das folhas, devido a doenças ou a tensões ambientais, ou mesmo como resultado de fenómenos naturais como a senescência, a interação com a radiação vai ser diferente, o que pode ser observado através de imagens captadas por sensores de detecção remota. Uma planta saudável possuirá, no geral, maior densidade foliar e também maior quantidade de clorofila, o que traduzirá numa diminuição da refletância na região do visível e aumento no infravermelho próximo (Guo et al., 2019; Tehrany et al., 2017).

Todas estas interações se alteram se o estado vegetativo das plantas se alterar, o que permite detetar, através de detecção remota, situações de tensão ambiental (*stress*). Assim, por exemplo, quando as plantas se encontram em *stress* (frio ou falta de água) há uma redução na produção dos pigmentos fotossintéticos, o que implica um aumento da refletância no azul e no vermelho. A diminuição do teor de água dos tecidos foliares pode provocar o aumento da refletância em todas as bandas espectrais.

2.6 Programas espaciais mais importantes e respetivos satélites

Há várias formas de classificar os sensores de detecção remota, a mais comum tem por base a capacidade do sensor em emitir e receber energia (sensores ativos) ou apenas em recebê-la (sensores passivos). Também se podem classificar consoante a gama de comprimentos de onda que captam (Amorim, 2015).

O veículo transportador dos sensores que fazem a detecção remota denomina-se Plataforma. As plataformas mais comuns são satélites ou aviões, mas podem incluir *drones*, balões, helicópteros, entre outros (Amorim, 2015). Um mesmo satélite pode transportar vários sensores, com fins muito distintos. Atualmente, há numerosos satélites de observação da Terra, sendo apenas referidos alguns deles no presente trabalho.

Na Tabela 2.1 estão mencionados os primeiros lançamentos de satélites, assim como o país que desenvolveu a tecnologia, data de lançamento e nome do satélite.

Tabela 2.1 - Primeiros lançamentos de satélites bem-sucedidos [(Emery & Camps, 2017c)]

Ordem	País	Data	Satélite
1	União soviética	4 de Outubro de 1957	Sputnik-1
2	Estados unidos	1 de Fevereiro de 1958	Explorer-1
3	França	26 de Novembro de 1965	Astérix
4	Japão	11 de Fevereiro de 1970	Osumi
5	China	24 de Abril de 1970	Dong Fang Hong I
6	Reino unido	28 de Outubro de 1971	Prospero
7	India	18 de Julho de 1980	Rohini D1
8	Israel	19 de Setembro de 1988	Ofeg 1
9	Rússia	21 de Janeiro de 1992	Kosmos 2175
10	Ucrânia	13 de Julho de 1992	Strela
11	Irão	2 de Fevereiro de 2009	Omid
12	Coreia do Norte	12 de Dezembro de 2012	Kwangmyongsong-3, unit 2

Segundo Klemas (2009), em 2009 existiam em órbita 29 satélites de alta resolução (0,5 a 1,8 m) e 44 de média resolução (2 a 36 m).

Tabela 2.2 - Sensores mais usados, respetivos satélites e principais características [adaptado de Klemas (2009)]

Satélite	Sensor	Banda espectral (μm)	Resolução (m)	Ciclo (dias)	Largura da faixa (km)
Landsat 1,2 e 3	MSS	4 (0,5 a 0,6) 5 (0,6 a 0,7) 6 (0,7 a 0,8) 7 (0,8 a 1,1)	80	18	180
Landsat 4 e 5	TM	1 (0,45 a 0,52) 2 (0,52 a 0,60) 3 (0,63 a 0,69) 4 (0,76 a 0,90) 5 (1,55 a 1,75) 6 (2,08 a 2,35) 7 (10,40 a 12,50)	30 (da banda 1 à 6) 120 (na banda 7)	16	180
Landsat 7	TM	1 (0,450 a 0,514) 2 (0,525 a 0,605) 3 (0,630 a 0,690) 4 (0,750 a 0,900) 5 (1,55 a 1,75) 6 (10,40 a 12,50) 7 (2,08 a 2,35) 8 (pan) (0,52 a 0,90)	30 (da banda 1 à 7) 60 (na banda 6) 15 (na banda 8)	16	180

Satélite	Sensor	Banda espectral (μm)	Resolução (m)	Ciclo (dias)	Largura da faixa (km)
SPOT	HRV	1 (0,50 a 0,59) 2 (0,61 a 0,68) 3 (0,79 a 0,89) 4 (0,51 a 0,73)	20 (da banda 1 à 3) 10 (na banda 4)	26 (diariamente e se a câmara estiver inclinada)	60
IKONOS		1 (0,45 a 0,52) 2 (0,52 a 0,60) 3 (0,63 a 0,69) 4 (0,76 a 0,90) 5 (pan) (0,45 a 0,90)	4 (da banda 1 à 4) 1 (na banda 5)	menos de 3	11
NOAA	AVHRR	1 (0,58 a 0,68) 2 (0,725 a 1,1) 3 (3,55 a 3,93) 4 (10,5 a 11,3) 5 (11,5 a 12,5)	1 100	2/dia	2 400
Orbview 2	SeaWiFS	1 (404 a 422) 2 (433 a 453) 3 (480 a 500) 4 (500 a 520) 5 (545 a 565) 6 (660 a 680) 7 (745 a 785) 8 (845 a 885)	1 100	diariamente	2 800

A "National Aeronautics and Space Administration" (NASA) desenvolveu o programa *Landsat*. O primeiro satélite *Landsat* foi lançado para o espaço em 1972 (NASA, 2019b) estando atualmente em órbita 2 satélites (*Landsat 7* e *Landsat 8*). O programa *Landsat* é um dos que possui um registo global da superfície do planeta mais extenso em termos temporais (NASA, 2019a). Os satélites deste programa transportavam o MSS e o TM, dois sensores que se descrevem em seguida. O *Multispectral Scanner System* (MSS) é um radiómetro de observação da Terra, geralmente com 4 a 5 bandas (0,5 e 1,1 μm) (NASA, 2019b). O *Thematic Mapper* (TM) é um radiómetro multiespectral, geralmente com 7 bandas (ESA, 2015b).

O primeiro satélite SPOT-1 foi lançado para o espaço em 1986 pela Agência Espacial Europeia (ESA), tendo sido seguido por vários, o último dos quais (SPOT-7) lançado em 2014. Fornece imagens (ópticas) de vastas áreas, com uma alta resolução (Klemas, 2009).

Os satélites *Landsat* e SPOT foram desenvolvidos para apoiar estudos sobre os recursos terrestres: estudos hidrológicos, geológicos, agrícolas, florestais, estudos sobre as formações vegetais naturais.

Para estudos meteorológicos foram desenvolvidos outros tipos de satélites como é o caso dos satélites NOAA- AVHRR. Estes satélites foram concebidos para produzir imagens diárias dos padrões de nuvens à escala regional para auxiliar as previsões meteorológicas. No entanto, também são úteis em estudos da vegetação (Klemas, 2009).

O *Copernicus* é um programa de observação da Terra, gerido pela Comissão Europeia, que deu continuação ao programa *Global Monitoring for Environment and Security*. Este programa tem como objetivo a recolha de informação de diferentes aspetos da superfície do Planeta (medições terrestres, marítimas e atmosféricas), através de dados obtidos por satélites, na verdade um conjunto de constelações de satélites denominados *Sentinel* (Colson et al., 2018, Ienco et al., 2019; Direção Geral do Território, 2017a).

A implementação do programa teve parceria com a ESA, os Estados-Membros, a Organização Europeia para a Exploração de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT), o Centro Europeu para as Previsões Meteorológicas a Médio Prazo (ECMWF), Agências da União Europeia e o *Mercator Océan* (Copernicus, n.d.).

As aplicações deste programa têm sido variadíssimas, como a proteção ambiental, a gestão de áreas urbanas, o planeamento (tanto a nível local como regional), o planeamento e gestão da agricultura, da silvicultura, da pesca, da saúde, dos transportes, das alterações climáticas, do desenvolvimento sustentável, da proteção civil ou mesmo do turismo (Direção Geral do Território, 2017b).

Os *Sentinels* são um conjunto de famílias de satélites, também designadas por missões. As 3 primeiras missões do *Sentinel* (*Sentinel 1*, *Sentinel 2* e *Sentinel 3*) são constituídas por dois satélites que operam em conjunto com o objetivo de aumentar a frequência de obtenção de imagens (Ienco et al., 2019).

As principais características das missões *Sentinel* podem ser observadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Resumo da missão *Sentinel* [adaptado do documento da comissão europeia (Europeia, 2018)]

	<i>Sentinel-1</i>	<i>Sentinel-2</i>	<i>Sentinel-3</i>	<i>Sentinel-4</i>	<i>Sentinel-5</i>		<i>Sentinel-6</i>
Características	Missão RADAR	Missão ótica de alta resolução terrestre	Imagens terrestres e dos oceanos	Monitorização da atmosfera	Monitorização da atmosfera		Altimetria oceânica de alta precisão
Nº de unidades	4: A, B, C e D	4: A, B, C e D	4: A, B, C e D	2: A e B	4: A, B, C e P		2: A e B
Período de operação	A, B: 2014 – 2022 C, D: 2022-2030	A, B: 2015 – 2023 C, D: 2023-2030	A, B: 2016 – 2023 C, D: 2023-2030	2022 – 2040	A, B, C: 2022 - 2040	P: 2017 - 2024	A: 2020 – 2025 B: 2025 - 2030
Altitude da órbita do satélite	693 km	786 km	814,5 km	35 786 km	817 km	824 km	1 336 Km

A missão *Sentinel 1* tem sido, especialmente, aplicada à monitorização de meios marinhos e terrestres (Direção Geral do Território, 2017a; ESA, n.d.; Europeia, 2018).

A missão *Sentinel 2* tem tido aplicação, sobretudo, na monitorização de meios terrestres. Em conjunto, os dois satélites *Sentinel 2* (*Sentinel-2A* e *Sentinel-2B*) permitem uma elevada frequência de revisitação, que varia entre 5 dias no Equador e 2 a 3 dias nas latitudes médias (lenco et al., 2019). Estes satélites transportam o sensor MSI, que mede a radiação solar refletida em 13 bandas espectrais, desde os 443 nm até aos 2 190 nm (Bonansea et al., 2019), como se pode observar na Tabela 2.4. A resolução espacial varia consoante a banda espectral, podendo ser de 10 m, 20 m e 60 m (Chen et al., 2019).

Tabela 2.4 - Bandas espectrais captadas pelo sensor MSI incorporado nos satélites *Sentinel 2* [adaptado de (ESA, 2019)]

Nº da banda espectral	Região do espectro eletromagnético	Banda	Comprimento de onda (nm) – centro-	Resolução espacial (m)
1	Visível	C/A	443	60
2	Visível	BLUE	490	10
3	Visível	GREEN	560	10
4	Visível	RED	665	10
5	VNIR	VRE	704	20
6	VNIR	VRE	740	20
7	VNIR	VRE	783	20
8	VNIR	NIR	842	10
8a	VNIR	NIR	865	20
9	VNIR	WV	940	60
10	SWIR	CIRRUS	1375	60
11	SWIR	SWIR	1610	20
12	SWIR	SWIR	2190	20

Onde:

Visível: banda do visível

VNIR (*visible and near-infrared*): visível e infravermelho próximo

SWIR (*Short-wavelength infrared*): infravermelho médio de comprimento de onda curto

NIR (*Near-infrared*): infravermelho próximo

WV: vapor de água

CIRRUS: nuvens

VRE (*Vegetation Red Edge*): zona espectral onde a refletância aumenta abruptamente de vermelho para infravermelho

BLUE: banda azul do visível

GREEN: banda verde do visível

RED: banda vermelha do visível

C/A: Costeiro / Aerossol

A missão *Sentinel 3* tem sido aplicada à monitorização ambiental e climática, ajudando ainda, na segurança e proteção marítima (zonas costeiras) (Direção Geral do Território, 2017a; ESA, n.d.; Europeia, 2018).

A missão *Sentinel 4* é sobretudo aplicada à monitorização atmosférica, obtendo informação, com uma elevada resolução temporal, sobre a qualidade do ar, níveis de ozono estratosféricos e radiação solar (Direção Geral do Território, 2017a; ESA, n.d.; Europeia, 2018).

A missão *Sentinel 5* foi projetada, especialmente, para a monitorização atmosférica. O *Sentinel 5P* foi o único lançado nesta missão até agora. Tem incorporado um sensor avançado capaz de cartografar poluentes como o NO₂, CH₄, CO e aerossóis (ESA, 2017). Os restantes satélites, com data de lançamento prevista para 2022, também irão monitorizar sobretudo a atmosfera, nomeadamente a qualidade do ar, os níveis de ozono na estratosfera e a radiação solar (Direção Geral do Território, 2017a; ESA, n.d.; Europeia, 2018).

A missão *Sentinel 6* irá colmatar a falta de informação sobre a topografia oceânica, o que irá ajudar na monitorização das mudanças do nível do mar, essenciais para o estudo das

alterações climáticas. Irá ainda fornecer informação sobre as correntes oceânicas, a velocidade do vento, altura das ondas (Direção Geral do Território, 2017a; ESA, 2015a; Europeia, 2018).

As imagens do *Sentinel* podem ser obtidas gratuitamente, *online*, no *Copernicus Open Access Hub*, através do link <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. A ESA lançou um conjunto de Caixas de Ferramentas *Open Source* para os produtos da série de satélites *Sentinel*, denominada *Sentinel Application Platform* (SNAP), que possibilita o processamento e análise das Imagens.

O custo de aquisição de imagens sempre foi uma limitação ao uso generalizado das imagens de satélite. No entanto, atualmente as imagens do *Sentinel* podem ser obtidas gratuitamente, assim como a sua manipulação, o que possibilita a sua utilização por um público mais vasto, em áreas mais extensas e em períodos temporais mais alargados (Houborg et al., 2015).

2.7 Índices espectrais de Vegetação

O facto da interação da radiação solar com os objetos, nomeadamente as plantas, variar consoante a região espectral, faz com que seja possível a criação de índices capazes de quantificar as características das plantas (Gómez, 2017). Os índices espectrais de vegetação consistem em combinações aritméticas da informação proveniente de duas ou mais bandas espectrais individuais, combinações estas que fazem destacar o sinal espectral proveniente da vegetação em comparação ao sinal dos objetos envolventes (Rokni & Musa, 2019). Os IV têm-se revelado correlacionados com parâmetros biológicos e fisiológicos da vegetação como é o caso da biomassa, peso seco, grau de cobertura, índice de área foliar (LAI), o que permite a sua utilização na monitorização das comunidades vegetais (Silva et al., 2009). Um bom índice de vegetação deve realçar o sinal da vegetação, ser pouco sensível à presença de objetos “não-verdes” como é o caso do solo, rochas e água, minimizar efeitos externos (atmosfera e geometrias de iluminação e observação) e ser de aplicação generalizável no espaço e no tempo.

Muitos IV, nomeadamente os primeiros desenvolvidos, usavam, geralmente, as bandas do vermelho e do infravermelho próximo, devido à resposta diferenciada da vegetação nestas duas regiões espectrais. A resposta da vegetação na região do vermelho é inversamente proporcional, de uma forma não-linear, com a quantidade de biomassa verde presente. A resposta na região do infravermelho próximo é diretamente proporcional, de uma forma também não-linear, com a quantidade de biomassa verde presente. Como já referido, a refletância nestas duas regiões espectrais está fortemente dependente de características da vegetação, tanto estruturais como bioquímicas.

À medida que foram surgindo sensores que captam a radiação de outras regiões do espectro eletromagnético, foram desenvolvidos novos IV. Não existe um índice “ideal”, mas vários índices mais recentes, com fórmulas relativamente complexas que conseguem ser relativamente insensíveis a uma vasta gama de perturbações externas, fornecendo informação bastante fiável sobre a vegetação.

Em seguida descrevem-se os índices espectrais de vegetação mais comuns, onde ρNIR representa a refletância na região do infravermelho próximo e ρRED a refletância na região do vermelho.

O “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI), desenvolvido por Rouse et al (1974), é um índice muito utilizado em estudos do coberto vegetal pois permite distinguir a vegetação fotossinteticamente ativa da restante (Wilson & Norman, 2018). Permite, assim, estudar, a longo prazo, as modificações do coberto vegetal. O NDVI também permite acompanhar as alterações fenológicas da vegetação (ao longo das estações do ano) desde o máximo da atividade fotossintética até ao período de senescência (Lira et al., 2011). O NDVI é calculado através da seguinte equação (1):

$$(1) \text{NDVI} = \frac{(\rho\text{NIR} - \rho\text{RED})}{(\rho\text{NIR} + \rho\text{RED})}$$

Os valores teóricos do NDVI variam entre -1.0 e + 1.0. A água, a neve e o gelo têm valores negativos uma vez que estes corpos possuem refletância mais elevada no vermelho do que no infravermelho próximo. Como as rochas e solos apresentam resposta semelhante nestas duas bandas espectrais, são caracterizados por um NDVI próximo de zero. A vegetação, possui, no geral, valores positivos deste índice espectral. À medida que a biomassa e grau de cobertura das plantas aumenta, o valor do NDVI aumenta. O valor do NDVI de zonas de elevada densidade de coberto vegetal tenderá, para o valor 1 (Braz et al., 2015; Gomes, 2018). Existem estudos que mostram a importância deste índice na relação entre a dinâmica da vegetação e a biodiversidade (nomeadamente na distribuição de algumas espécies de fauna (Pettorelli et al., 2005).

O NDVI tem a vantagem de ser de cálculo fácil. No entanto, é muito sensível à influência do substrato em que a vegetação ocorre, especialmente nos casos de baixa densidade do coberto vegetal. Por outro lado, torna-se pouco sensível para elevados valores da biomassa (Shahrokhnia & Ahmadi, 2019).

Pelo facto do NDVI poder, por vezes, não fazer uma boa avaliação da quantidade de vegetação presente (Demarchi et al., 2011) houve, assim, a necessidade de criação de novos índices espectrais, nomeadamente índices mais independentes do substrato. Foram, assim, desenvolvidas várias versões do NDVI, de complexidade crescente.

O primeiro a ser criado foi o “Soil Adjusted Vegetation Index” (SAVI), por Huete (1988), que tem por objetivo minorar a contribuição do solo para a resposta espectral, através da incorporação de um fator ou coeficiente de ajustamento, L (equação 2):

$$(2) \text{SAVI} = \frac{(\rho\text{NIR} - \rho\text{RED}) \times (1 + L)}{(\rho\text{NIR} + \rho\text{RED} + L)}$$

Se a vegetação tiver elevada densidade ou cobertura L toma o valor de 0,25, se tiver valores intermédios L toma o valor 0,5 e se tomar baixos valores L toma o valor 1. Na ausência desse

conhecimento é comumente usado o valor de 0.5 (Demarchi et al., 2011; Boratto & Gomide, 2013). O SAVI é útil em áreas onde existe solo exposto, isto é, onde não há total cobertura pela vegetação (Boratto & Gomide, 2013).

O “Modified Soil Adjusted Vegetation Index” (MSAVI) foi criado por Qi et al. (1994) para melhorar as limitações do SAVI, nomeadamente, para não ser tão sensível à influência do solo, substituindo a constante L por um fator dinâmico de ajustamento ao solo (equação 3):

$$(3) \text{MSAVI} = \frac{2 \times \rho\text{NIR} + 1 - \sqrt{(2 \times \rho\text{NIR} + 1)^2 - 8 \times (\rho\text{NIR} - \rho\text{RED})}}{2}$$

O MSAVI encontra-se bem adaptado a zonas áridas e zonas com baixo grau de cobertura vegetal, o que o torna útil por exemplo para avaliar fenómenos de desertificação (Wu et al., 2019). Este índice também pode determinar, com elevada exatidão, o índice de Área Foliar de comunidades vegetais (Gonsamo & Chen, 2014).

O “Transformed Soil Adjusted Vegetation Index” (TSAVI), foi desenvolvido por Baret & Guyot (1991) e tenta também diminuir o efeito do solo na resposta espectral. Este índice utiliza o valor do declive e da ordenada na origem da linha do solo no espaço definido pela refletância no vermelho e no infravermelho próximo bem como um parâmetro de correção por forma a minimizar a influência do solo (Qi et al., 1994). A equação (4) mostra o cálculo deste índice:

$$(4) \text{TSAVI} = \frac{a \times (\rho\text{NIR} - a \times \rho\text{RED} - b)}{(b \times \rho\text{NIR} + \rho\text{RED} - a \times b + X \times (1 + a^2))}$$

Sendo

- a: declive da linha do solo
- b: ordenada da origem da linha do solo
- X: parâmetro de correção que minimiza o efeito do solo

Uma pequena variação, mas potencialmente importante do SAVI foi desenvolvida por Rondeaux et al. (1996) por forma a minimizar as variações devidas à contribuição do substrato, num novo índice de vegetação chamado “Optimized Soil Adjusted Vegetation Index” (OSAVI), definido pela equação (5):

$$(5) \text{OSAVI} = \frac{1,16 \times (\rho\text{NIR} - \rho\text{RED})}{\rho\text{NIR} + \rho\text{RED} + 0,16}$$

Estes autores efetuaram uma otimização do fator de ajustamento, L, tendo recomendado, para aplicações gerais, o valor de 0.16 em vez de 0.5, valor usado no SAVI.

O “Normalized Difference Infrared Index” (NDII) é calculado com base na refletância no vermelho e no infravermelho de curto comprimento de onda (equação 6):

$$(6) \text{ NDII} = \frac{(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{SWIR}})}{(\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{SWIR}})}$$

Onde:

ρ_{SWIR} - refletância espectral na região do infravermelho de ondas curtas.

Este índice baseia-se no contraste entre a difusão da radiação do infravermelho próximo na estrutura interna das folhas e a absorção, pela água, da radiação do infravermelho de ondas curtas (Hunt et al., 2011). O NDII é sensível ao conteúdo hídrico das plantas e tem sido aplicado na monitorização do estado das plantas em vários tipos de formações vegetais na medida em que plantas saudáveis normalmente possuem uma elevada turgidez nos seus tecidos foliares (Wilson & Norman, 2018).

O “Difference Vegetation-Index” (DVI) foi desenvolvido por Richardson & Wiegand (1977) (equação 7):

$$(7) \text{ DVI} = \rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}$$

Este índice tem a vantagem de ser muito simples mas, como não é normalizado, não compensa influências causadas pela atmosfera ou sombras (Naji, 2018).

O “Green Normalized Difference Vegetation Index” (GNDVI) é um índice criado a partir do NDVI, alterando a refletância na banda do vermelho para a do verde (equação 8):

$$(8) \text{ GNDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{GREEN}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{GREEN}}}$$

Onde:

ρ_{GREEN} - Refletância na região do verde

Este índice revelou ser mais sensível a variações no teor em clorofila da vegetação do que outros índices espectrais de vegetação (Shahrokhnia & Ahmadi, 2019).

O “Enhanced Vegetation Index” (EVI) foi proposto para estimar a quantidade de vegetação, principalmente em áreas de elevada densidade do coberto vegetal, casos em que se verifica a saturação do NDVI (Pettorelli et al., 2005). Este índice usa a refletância no azul para corrigir a influência do solo e da atmosfera (equação 9):

$$(9) \text{ EVI} = G \times \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + C1_{\text{RED}} - C2_{\text{BLUE}} + L}$$

Onde:

$C1_{\text{RED}}$ - Coeficiente de correção devido a aerossóis na refletância no infravermelho próximo e vermelho, tomando geralmente o valor 6

C2_{BLUE} – Coeficiente de correção devido a aerossóis na refletância no azul, tomando geralmente o valor 7,5
 G – Fator de ganho, tomando geralmente o valor 2,5
 L – fator de correção da influência do solo, tomando geralmente o valor 1

O “Global Environmental Monitoring Index” (GEMI) é um índice não linear proposto por Pinty & Verstraete (1992) que entra em conta, em simultâneo, com os efeitos do solo e da atmosfera (equação 10):

$$(10) \text{ GEMI} = \eta \times (1 - 0,25 \times \eta) - \frac{\rho_{\text{RED}} - 0,125}{1 - \rho_{\text{RED}}}$$

Onde:

$$\eta = \frac{2 \times (\rho_{\text{NIR}}^2 - \rho_{\text{RED}}^2) + 1,5 \times \rho_{\text{NIR}} + 0,5 \times \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}} + 0,5}$$

Comparativamente ao NDVI o GEMI tem menor sensibilidade à influência da atmosfera. No entanto, é afetado pela presença do solo, por isso não é recomendado em zonas de vegetação esparsa (Shahrokhnia & Ahmadi, 2019). Devido à sua formulação complexa o GEMI é difícil de interpretar.

O "Perpendicular Vegetation Index" (PVI) foi desenvolvido por Richardson & Wiegand (1977). Este índice espectral foi elaborado com base no fato de ser possível remover o efeito do substrato na refletância das formações vegetais tendo em conta que a refletância dos solos e rochas na região do vermelho se relaciona linearmente com a refletância no infravermelho próximo, no espaço definido pela refletância naquelas duas regiões espectrais (equação 11):

$$(11) \text{ PVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - 1,163 \times \rho_{\text{RED}} - 0,017}{\sqrt{1 + 1,163^2}}$$

Uma das limitações do PVI consiste nas condições da atmosfera, devendo sempre proceder-se a uma correção atmosférica das imagens antes do seu cálculo (Naji, 2018).

O “Normalized Difference Vegetation Change Index” (NDVCI) foi desenvolvido, recentemente, por Rokni & Musa (2019), com o intuito de detetar mudanças no coberto vegetal entre duas imagens obtidas em momentos diferentes (equação 12):

$$(12) \text{ NDVCI} = \left(\frac{\rho_{\text{NIR}_{t1}} - \rho_{\text{RED}_{t2}}}{\rho_{\text{NIR}_{t1}} + \rho_{\text{RED}_{t2}}} \right) - \left(\frac{\rho_{\text{NIR}_{t2}} - \rho_{\text{RED}_{t1}}}{\rho_{\text{NIR}_{t2}} + \rho_{\text{RED}_{t1}}} \right)$$

Onde:

t₁ – Imagens obtidas no tempo 1
 t₂ – Imagens obtidas no tempo 2

Este índice mostrou ser superior ao NDVI e ao EVI numa vasta gama de formações vegetais.

A utilização, no cálculo dos IV, de regiões espectrais do RE poderá permitir estimar, de uma forma mais robusta, o teor em clorofila das plantas e, consequentemente, o seu estado fisiológico, em comparação com as combinações do vermelho e do infravermelho próximo, tipicamente usadas. Além disso, estes novos índices tentam ultrapassar limitações dos índices tradicionalmente mais usados, como é o caso do NDVI, que apresentam problemas de saturação para médias/elevadas quantidades de biomassa.

É o caso do “Transformed Chlorophyll Absorption Reflectance Index” (TCARI) (Haboudane et al., 2004) que minimiza a influência do solo e processos de difusão da radiação na copa da vegetação. Este índice foi desenvolvido para vegetação agrícola com copado uniforme e mostrou-se muito correlacionado com o conteúdo em clorofila das plantas, o que o torna útil para aplicação em agricultura de precisão, uma vez que o teor em azoto está estritamente dependente da quantidade de clorofila. Zarco-Tejada et al. (2019) usaram este índice na determinação do conteúdo em clorofila de agulhas de pinheiros. Pode ser calculado através da equação (13):

$$(13) \text{ TCARI} = 3 \times \left((\rho_{\text{VRE}} - \rho_{\text{RED}}) - 0,2 \times (\rho_{\text{VRE}} - \rho_{\text{GREEN}}) \times \left(\frac{\rho_{\text{VRE}}}{\rho_{\text{RED}}} \right) \right)$$

Onde:

ρ_{VRE} - refletância espectral na região do *Vegetation Red Edge*

O “Wide Dynamic Range Vegetation Index” (WDRVI) foi desenvolvido por Gitelson (2004) e constitui uma pequena, mas importante, alteração ao NDVI, uma vez que parece solucionar o problema de saturação daquele índice para moderados/elevados valores de biomassa. A alteração consiste na introdução de um coeficiente α a afetar o valor da refletância no vermelho e que reduz a disparidade da contribuição entre as bandas do vermelho e do infravermelho próximo. A equação (14) mostra como o mesmo índice pode ser calculado:

$$(14) \text{ WDRVI} = \frac{\alpha \times \rho_{\text{VRE}} - \rho_{\text{RED}}}{\alpha \times \rho_{\text{VRE}} + \rho_{\text{RED}}}$$

Onde:

α tem um valor entre 0,1 e 0,2, o que aumenta a correlação com a fração da vegetação, linearizando a relação do dossel

O “Normalized Difference Moisture Index” (NDMI) relaciona-se com o conteúdo hídrico da copa das plantas (Xiao et al., 2019) e pode-se calcular através da equação (15):

$$(15) \text{ NDMI} = \frac{(\rho_{\text{RED}} - \rho_{\text{NIR}})}{(\rho_{\text{RED}} + \rho_{\text{NIR}})}$$

O “Modified Triangular vegetation Index” (MTVI) é um índice de vegetação que se encontra relacionado com o Índice de Área Foliar. Consegue ser resistente à influência do substrato, bem

como à saturação para elevados valores de densidade do coberto vegetal. O seu cálculo exprime-se através da equação (16):

$$(16) \text{MTVI} = 1,2 \times (1,2 \times (\rho_{\text{RED}} - \rho_{\text{BLUE}}) - 2,5 \times (\rho_{\text{GREEN}} - \rho_{\text{BLUE}}))$$

O “Three Band Water Index” (TBWI) foi desenvolvido para combinar três bandas com sensibilidade a parâmetros biofísicos da vegetação diferentes e revelou-se correlacionado com o conteúdo de água das folhas bem como com o grau de cobertura (Jin et al., 2013, 2020). Equação (17):

$$(17) \text{TBWI} = \frac{\rho_{\text{WV}} - \rho_{\text{SWIR}}}{\rho_{\text{CIRRUS}}}$$

O “Renormalized Difference Vegetation Index” (RDVI) foi proposto para combinar as vantagens do DVI e do NDVI para baixos e elevados valores de quantidade de vegetação, respetivamente, e mostra-se insensível aos efeitos do substrato e da geometria de aquisição da imagem (Haboudane et al., 2004). Calculado com a equação (18):

$$(18) \text{RDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{(\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}})^{\frac{1}{2}}}$$

O “Normalized Burn Ratio” (NBR) foi desenvolvido para determinação de áreas ardidas (Cardil et al., 2019) e pode-se calcular através da equação (19):

$$(19) \text{NBR} = \frac{(\rho_{\text{RED}} - \rho_{\text{SWIR}})}{(\rho_{\text{RED}} + \rho_{\text{SWIR}})}$$

2.8 Casos de estudo sobre florestas onde se utilizaram imagens *Sentinel 2*

Neste subcapítulo apresentam-se vários estudos nos quais foram usadas imagens do *Sentinel 2* para estimar não só a biomassa de florestas como também parâmetros dendrométricos.

Forkuor et al. (2020) usaram imagens *Sentinel 2* para estudar a biomassa de diferentes tipos de savanas e florestas tropicais no Sudão. Calcularam o NDVI tradicional, o NDVI calculado com uma banda do RE e um novo índice que designaram por STVI, em várias versões, que, além da banda do vermelho, usa as bandas do VNIR e do SWIR. Os autores obtiveram bons resultados e frisaram a importante possibilidade do uso de dados gratuitos para mapear e monitorizar a biomassa em regiões onde a informação é escassa, para a gestão sustentável de florestas.

Liu et al. (2019) utilizaram imagens *Sentinel 1* e *2* para estimar a biomassa de diferentes tipo de florestas no nordeste da China, tendo obtido bons resultados (R^2 entre 0,69 e 0,74). Os

índices calculados foram NDVI, EVI e RVI (SR) com combinações de várias bandas. Além da biomassa, também foi determinada a altura das árvores.

Alan et al. (2017) recorreram a imagens do *Sentinel 2* para estimar e mapear a biomassa de mangais nas Filipinas. Além das bandas óticas usaram o radar. Calcularam vários tipos de índices espectrais de vegetação, entre eles o NDVI, que correlacionaram com diferentes combinações de bandas, tendo em alguns casos obtido valores do coeficiente de correlação de 0,8.

Chen et al. (2020) estudaram florestas de mangais na China utilizando um total de 22 índices (convencionais, do RE e do SWIR). Combinaram estes índices com o LIDAR e dessa junção surgiram os melhores resultados. Alcançaram valores de $R^2=0,62$

Wittke et al. (2019) utilizaram imagens do *Sentinel* para a determinação de parâmetros dendrométricos e a biomassa em florestas boreais do sul da Finlândia, em diferentes períodos do ano. Calcularam 9 índices de vegetação e concluíram que o NDVI calculado com as Bandas 5 e 7 foi o melhor indicador dos diferentes parâmetros estudados.

Dang et al. (2019) usaram imagens do *Sentinel 2* para estimar a biomassa em diferentes tipos de florestas no Vietname. Usaram 52 índices em conjunto com bandas espectrais individuais e obtiveram um coeficiente de determinação de 0,92 entre a biomassa estimada pelo modelo e a biomassa medida no campo.

Ghosh & Behera (2018) empregaram imagens do *Sentinel 2* para calcular a biomassa de florestas densas tropicais no norte da Índia. Foram calculados 4 índices espectrais diferentes e obtiveram bons resultados na determinação de biomassa em diferentes tipos de florestas. O R^2 variou entre 0,62 e 0,67.

Um estudo sobre as florestas tropicais na Malásia, de Adan (2017), utilizou o *Sentinel 2* para determinação de biomassa. Foram calculados 7 índices de vegetação e os melhores coeficientes de correlação obtidos foram de 0,66. Estes autores verificaram que o uso das bandas de RE melhorou os modelos de regressão.

Halme et al., (2019) usaram imagens do *Sentinel 2* para estimação da biomassa e dados dendrométricos numa floresta de coníferas da Finlândia. Estes autores não utilizaram índices de vegetação, mas sim métodos não paramétricos não lineares. Os modelos desenvolvidos encontravam-se bem correlacionados com a biomassa e parâmetros dendrométricos.

Mensah et al. (2018) utilizaram o NDVI calculado com os dados do *Sentinel 2* num processo de classificação para detetar a fragmentação de florestas numa Reserva florestal no Gana.

Smith et al. (2018) utilizaram também imagens do *Sentinel* para determinar a desflorestação na Costa Rica e México, através de 6 índices espectrais.

Todos os autores dos artigos citados referiram a importância da utilização das bandas RE do *Sentinel*, bandas que não existem noutros sensores. Além disso referiram o fato das imagens do *Sentinel* serem gratuitas, o que possibilita a realização de estudos sobre florestas.

3. METODOLOGIA

A área de estudo, a forma de obtenção dos dados e seu tratamento serão descritos neste capítulo. Para além disso, será também descrita a metodologia usada e como foram realizadas as diversas etapas do trabalho.

3.1 Área de estudo

O trabalho conducente à presente dissertação foi desenvolvido na Herdade da Apostiça, situada na Península de Setúbal (Figura 3.1).

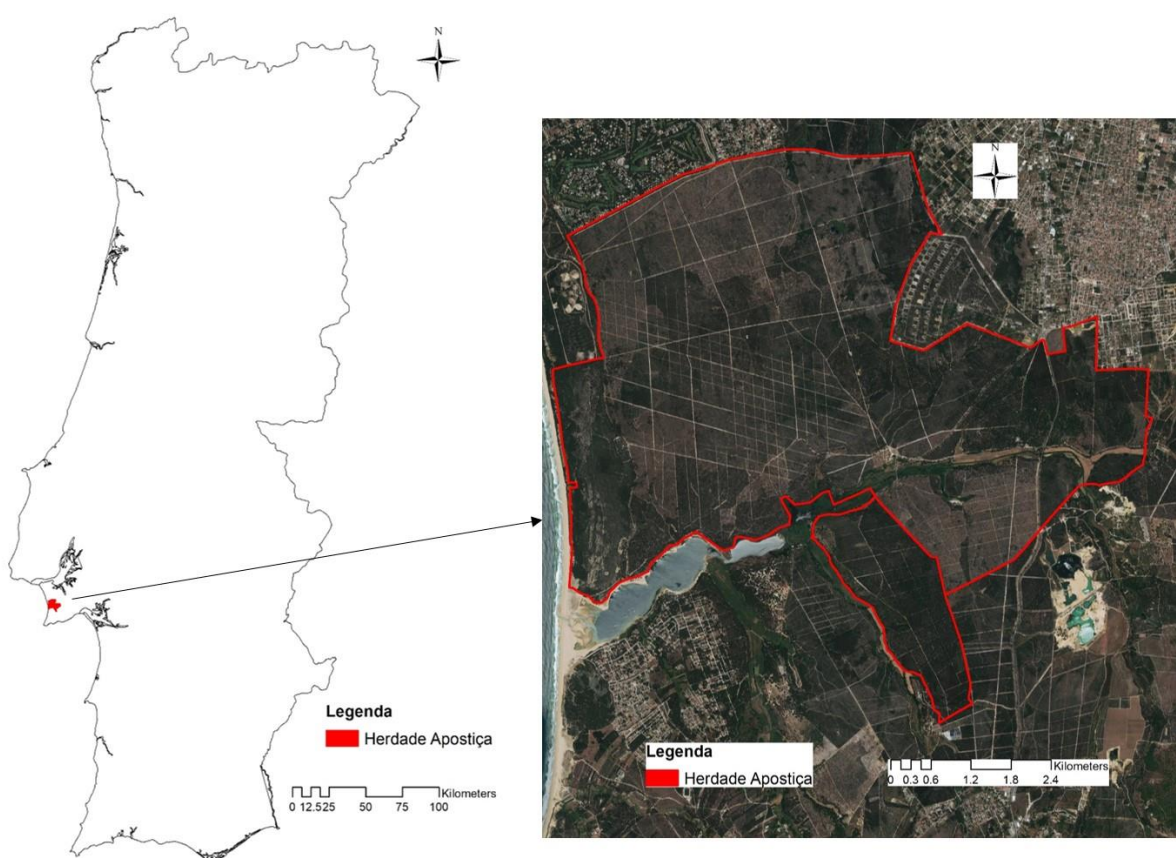


Figura 3.1 - Localização da Herdade da Apostiça

Esta Herdade (aproximadamente 3 763 ha de área) é explorada pela Companhia Agrícola da Apostiça, *Lda* e pela Câmara Municipal de Sesimbra. A maior parte da Herdade está ocupada com povoamentos de Pinheiro-bravo, existindo alguns povoamentos de Pinheiro-Manso. Constata-se igualmente a presença pontual de sobreiros, de regeneração natural. Existem campos de treino de caça entre outros equipamentos e espaços para desenvolvimento de desporto e lazer.

A área encontra-se dividida em talhões (divisão elementar da mata para a sua administração), para uma melhor gestão dos trabalhos silvícolas. O coberto arbustivo varia muito de talhão para talhão não só em termos de composição como no referente à quantidade de

biomassa, em função das operações de limpeza de matos. Os matos xerofíticos ocupam a generalidade da Herdade, matos dominados por *Ulex australis* subsp. *welwitschianus*, aparecendo ainda *Halimium halimifolium*, *Halimium commutatum*, *Cistus salvifolius* (Estevinha), *Cistus crispus* (Roselha), *Cistus ladanifer* (Esteva), *Daphne gnidium* (Trovisco-macho), *Phillyrea angustifolia* (Lentisco), *Quercus coccifera* (Carrasco), *Lavandula luisieri* (Rosmaninho), *Stauracanthus genistoides* e *Asparagus aphyllus* (Espargo-bravo). Aparece ainda a Torga (*Calluna vulgaris*) e a Urze-das-vassouras (*Erica scoparia*) (Rosário et al., 2006).

Segundo a classificação de Köppen-Geiger (Rubel & Kottek, 2010), uma das classificações climáticas mais usadas, a área de estudo encontra-se sob influência de um clima mediterrânico com verão quente (Csa). A temperatura média anual é de 16°C e a precipitação anual de aproximadamente 746 mm.

O diagrama termopluiométrico relativo a Setúbal (Normais Climatológicas 1951-1980) (Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, 1991) revela a existência de um clima tipicamente mediterrânico (Figura 3.2). A precipitação anual não é muito elevada, concentrando-se nos meses de Novembro a Abril, portanto na altura mais fresca do ano. O Inverno é húmido e de ameno a fresco. A Primavera é um período favorável ao crescimento das plantas devido à ocorrência simultânea de precipitação e de temperaturas propícias à atividade metabólica. O Verão é uma estação desfavorável para as plantas devido às temperaturas elevadas e baixa precipitação, portanto elevado défice hídrico. As chuvas de Outono possibilitam um recomeço da atividade fotossintética uma vez que as temperaturas nessa altura do ano ainda são favoráveis. Em resumo, o Inverno e, sobretudo, o Verão, são estações adversas para o crescimento vegetal que ocorre, assim, principalmente, no Outono e na Primavera.

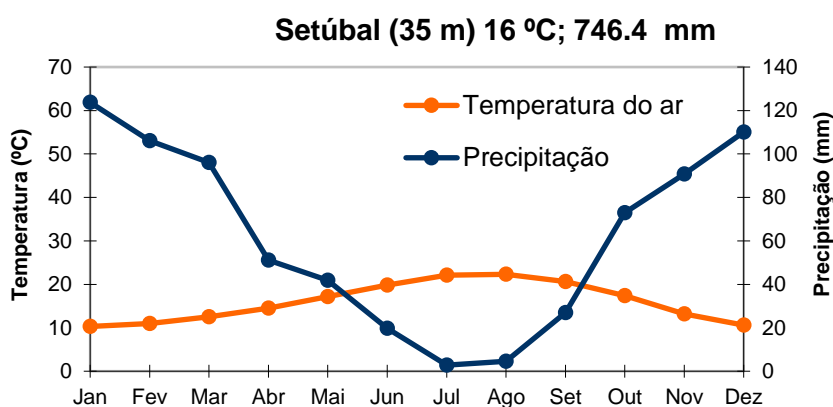


Figura 3.2 - Diagrama termopluiométrico relativo a Setúbal (Normais Climatológicas 1951-1980)

A Figura 3.3 representa a altitude da área de estudo: os valores variam entre 3 e 89 metros.

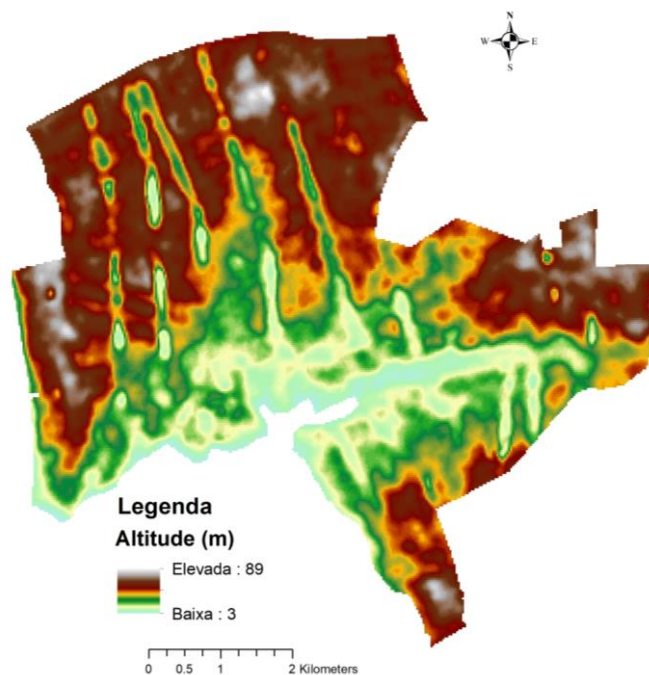


Figura 3.3 - Altitude da Herdade da Apostiça (aproximadamente 30 m de resolução espacial). [NASA (n.d.) ASTER Global Digital Elevation Map]

A maior parte da Herdade apresenta declives baixos, inferiores a 10% (Figura 3.4). Trata-se, portanto, de uma zona bastante plana.

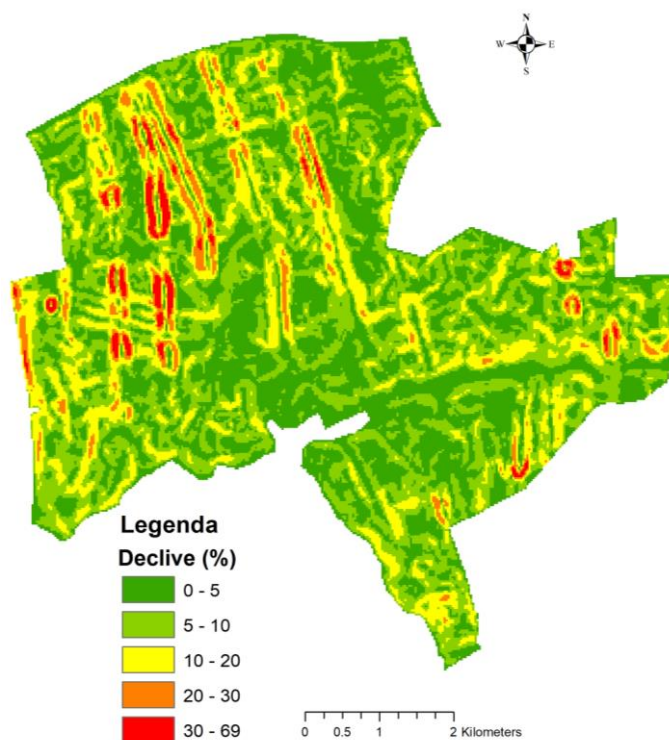


Figura 3.4 - Declive da Herdade da Apostiça (aproximadamente 30 m de resolução espacial). Mapa gerado a partir do *raster* da altitude, no *ArcMap*

Segundo a Carta Litológica do Atlas Digital do Ambiente (Atlas do Ambiente Digital, 2019) dominam na Herdade formações geológicas sedimentares, principalmente dunas e areias eólicas. Segundo a Carta de Solos também do Atlas Digital do Ambiente (Atlas do Ambiente Digital, 2019) a maior representatividade no respeitante ao tipo de solo diz respeito a Podzóis e Regossolos.

3.2 Métodos

Na Figura 3.5 é apresentado o esquema metodológico que foi seguido no presente trabalho.

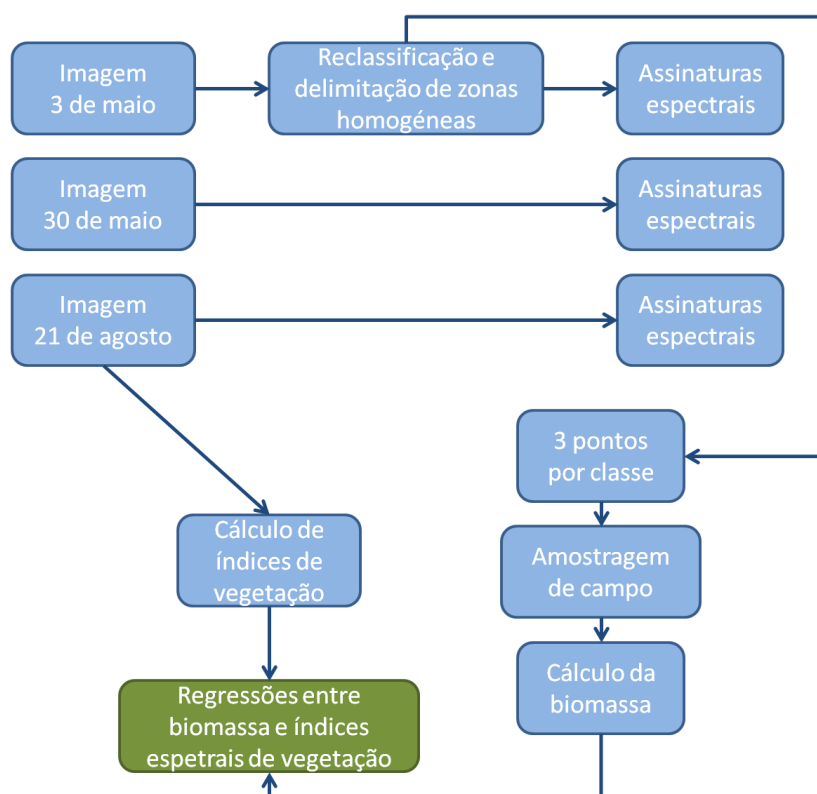


Figura 3.5 - Esquema metodológico do presente trabalho

Pretendia-se obter informação sobre a assinatura espectral da área em estudo em diferentes momentos do ano, por forma a perceber-se a relação entre os valores de deteção remota e o estado fisiológico da vegetação. Assim, foi consultado o *site* do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) (<https://www.ipma.pt/pt/>) que publica, para cada ano e mês, mapas com a relação da temperatura e precipitação com o valor médio do período 1971-2000 e ainda mapas onde se pode ver, ao longo do mês em causa, essa relação. Foram seleccionados três períodos para 2019: início de Maio, final de Maio e meados-final de Agosto.

Os dados retirados do IPMA foram comparados com as Normais Climatológicas de Setúbal (1971-2000) [IPMA], como se pode observar na figura 3.6. A partir de meados de Abril e em início de Maio a Temperatura foi próxima do valor médio. No mesmo período a Precipitação foi superior à média, tendo ocorrido episódios de precipitação na 3ª semana. Ou seja, no mês de Abril

desagravou-se um pouco a situação de seca que ocorrera no mês anterior. No mês de Maio a Precipitação foi muito inferior à média enquanto que a Temperatura foi superior, o que significa que neste mês houve falta de água no solo. Em Agosto a Precipitação foi ligeiramente superior à média e a Temperatura perto da média. Este mês, de baixa precipitação e temperaturas altas, foi um mês de elevado défice hídrico. Tanto os mapas como os gráficos que deram origem à Figura 3.6 podem ser observados no Anexo A e no *site* do IPMA (IPMA, n.d.).

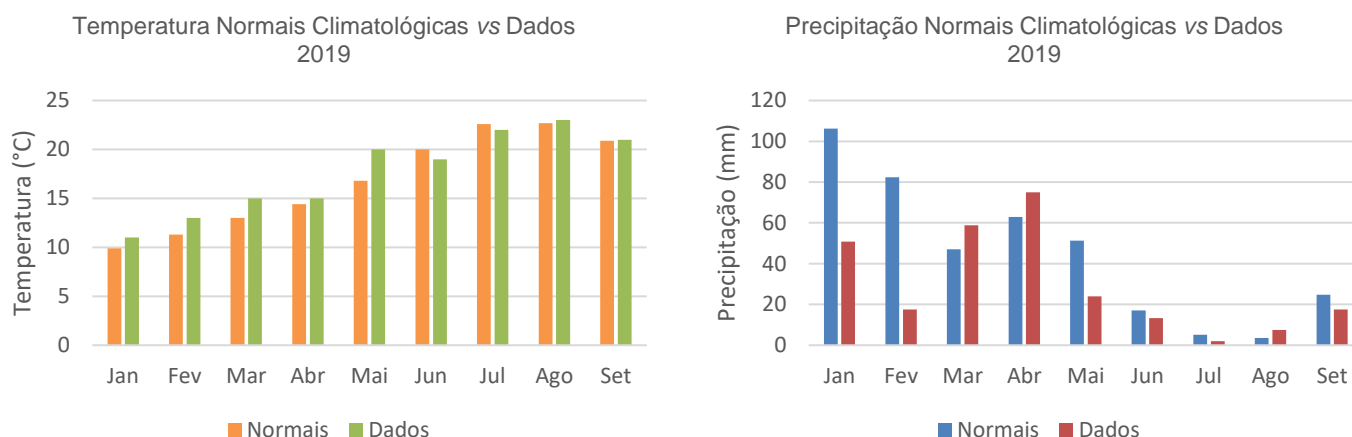


Figura 3.6 - Comparação das normais climatológicas com os dados obtidos do ano 2019: a) Temperatura; b) Precipitação

No portal *Copernicus Open Access Hub* foram retiradas imagens do *Sentinel-2B Level-1C* das seguintes datas referentes ao ano de 2019: 3 de Maio, 30 de Maio e 21 de Agosto. As imagens deste nível incluem correção radiométrica e geométrica com precisão ao nível do sub-pixel e dizem respeito à refletância no topo da atmosfera. Verificou-se visualmente a inexistência de nuvens ou neblina que pudessem afetar os valores da refletância, tendo-se considerado, por isso desnecessária, a correção atmosférica das imagens.

As bandas do *Sentinel* usadas foram: B03, B04, B05, B06, B07; B08, B08a, B11 e B12. Ou seja, foram excluídas as bandas B01, B09 e B10, geralmente utilizadas em estudos atmosféricos e geofísicos. O tratamento das imagens foi efetuado no *ArcMap 10.5.1* (ESRI). Foi efetuada uma operação de *resampling* através do método do vizinho mais próximo por forma a que as imagens das várias bandas tivessem todas a mesma resolução espacial, tendo as imagens ficado, no final, todas com a resolução de 10 m. Não se ganhou pormenor nas imagens cuja resolução passou de 20 m para 10 m, mas não se perdeu o pormenor das imagens de resolução de 10 m. Foi escolhido o método do vizinho mais próximo pois garante a consistência do tamanho do pixel e da refletância (Zhang et al., 2019).

3.2.1 Identificação de áreas homogéneas e sua assinatura espectral

Numa primeira fase foi analisada a imagem de 3 de Maio, tendo sido efetuada uma reclassificação automática (não assistida) para obtenção de áreas homogéneas para permitir

perceber-se a estrutura geral do coberto vegetal. A classificação foi realizada no *ArcMap* através da função *ISO Cluster Unsupervised Classification*, com as seguintes especificações:

- Número de bandas: 10 bandas;
- Número de classes: 6;
- Número máximo de iterações a realizar: 20;
- Número mínimo de pixels que cada classe pode ter: 20;
- Intervalo de pesquisa: 10;

Foram realizadas diversas tentativas para determinar qual seria o número ideal de classes, tendo-se tentado valores entre cinco a dez classes. Para cada tentativa o mapa resultante foi comparado com imagens do *Google Earth* por forma a determinar-se, visualmente, a relação entre as classes e a densidade do coberto vegetal. O valor de seis classes foi considerado o melhor pelo fato de permitir distinguir zonas de estradas/aceiros, (faixas ou linhas de compartimentação florestal), solo a nu e várias gradações de densidade.

Em relação a cada classe foram obtidos 50 pontos ao acaso e extraídos os valores da refletância para as bandas B02, B03, B04, B05, B06, B07, B08, B08a, B11 e B12. Ou seja, não foram obtidos valores para as bandas B01, B09 e B10, que são, geralmente, usadas para estudos atmosféricos e geofísicos. No excel foi feita a média do valor da refletância para os 50 pontos de cada classe e banda espectral e elaboradas as assinaturas espectrais. Para as imagens de Maio e Agosto foram igualmente elaboradas as assinaturas espectrais seguindo a mesma metodologia.

3.2.2 Amostragem no campo

Tentou-se assegurar que a amostragem das árvores abrangesse valores de biomassa representativos da população em estudo, tendo-se seguido, para tal, uma amostragem estratificada (Cai et al., 2019), com base na imagem reclassificada. Assim, foram criados 3 pontos por classe de uma forma aleatória, portanto um total de 18 pontos. No entanto, um dos pontos encontra-se num local afastado e de difícil acesso (praticamente impossível de ser acedido sem ser com viatura a tração às 4 rodas, devido à quantidade de areia), pelo que apenas foram amostrados 17 locais (Figura 3.7).

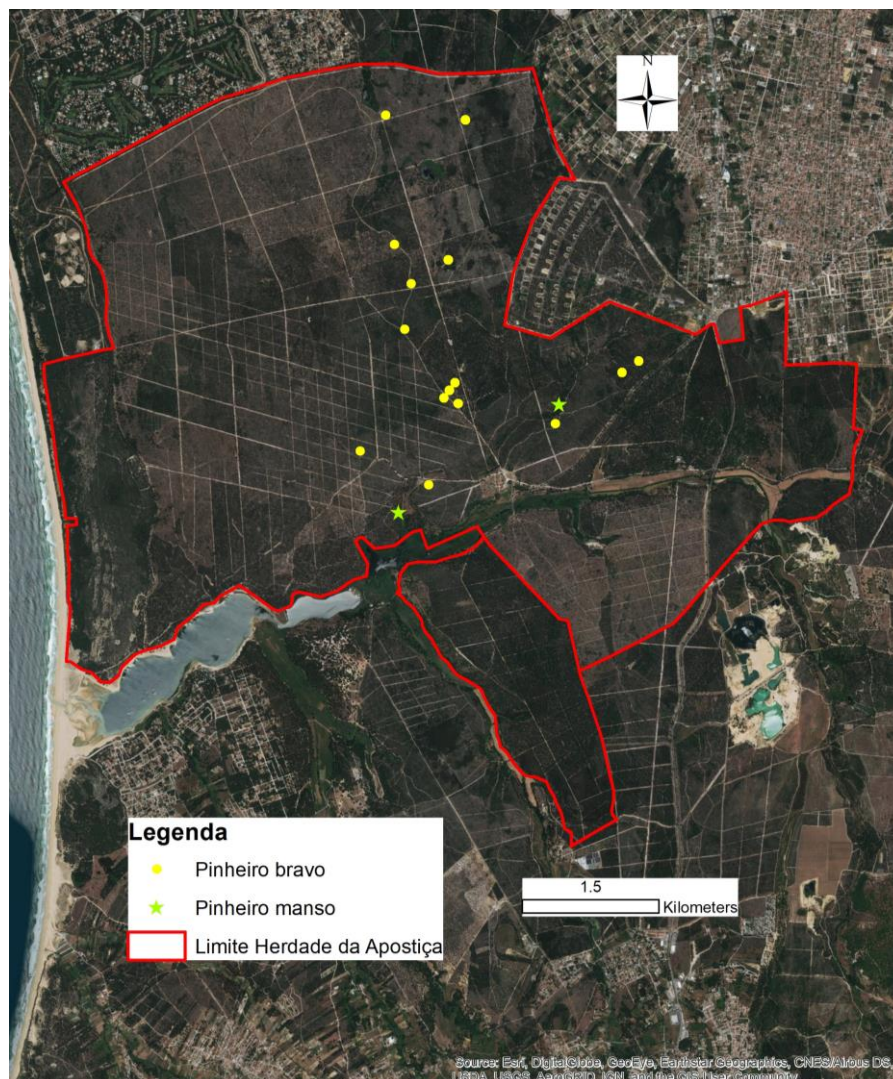


Figura 3.7 - Localização dos pontos de amostragem para determinação da biomassa

Nestes locais foram amostradas todas as árvores existentes numa circunferência de raio que variou consoante a espécie de pinheiro dominante, doravante designadas por parcelas. Assim, no caso do Pinheiro-bravo o raio foi de 12,62 m enquanto que no caso do Pinheiro-Manso o raio foi de 17,84 m. Estes valores estão definidos no procedimento do Inventário Florestal (ICNF, 2009).

Foi medida a altura total (desde a base da árvore até ao limite superior da copa) de todas as árvores presentes em cada parcela, com um Vertex III e um Transponder T3 (da marca Haglöf Sweden). Em cada árvore foram feitas duas medições do Diâmetro à Altura do Peito (1,30 m), perpendiculares entre si, com o auxílio de uma Suta. Alguns exemplares de Pinheiro-Manso tinham um tronco de elevada grossura e nestes casos foi medido o Perímetro à Altura do Peito pelo fato do tronco ultrapassar a largura da Suta.

3.2.3 Cálculo dos índices de vegetação

No *ArcMap*, à volta do ponto central de cada parcela foi criada uma zona tampão (*Buffer*) de raio 12,62 m para o caso dos locais em que o Pinheiro-bravo é dominante e de 17,84 m nos locais em que domina o Pinheiro-manso. Para cada banda espectral do *Sentinel* foram extraídos os valores da refletância para as zonas tampão das várias parcelas. Em seguida foi calculado o valor médio da refletância por unidade de área (m²), referente às várias parcelas. Com esses valores foram calculados os índices espectrais de vegetação apresentados na Tabela 3.1 em que ρ_{NIR} representa a refletância espectral na zona do visível e infravermelho próximo, ρ_{RED} representa a refletância espectral na banda do vermelho visível, ρ_{BLUE} representa a refletância espectral na banda do azul visível, ρ_{GREEN} representa a refletância espectral na banda do verde visível, ρ_{SWIR} representa a refletância espectral no infravermelho medio de comprimento de onda curta e o ρ_{VRE} representa a refletância espectral da vegetação do *Red Edge*..

Tabela 3.1 - Índices espectrais de vegetação

Índice	Cálculo - Fórmula
Difference Vegetation-Index	$DVI = \rho_{NIR} - \rho_{RED}$
Enhanced Vegetation Index	$EVI = G \times \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + C1 \times \rho_{RED} - C2 \times \rho_{BLUE} + L}$
Green Normalized Difference Vegetation Index	$GNDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{GREEN}}{\rho_{NIR} + \rho_{GREEN}}$
Modified Soil Adjusted Vegetation Index	$MSAVI = \frac{2 \times \rho_{NIR} + 1 - \sqrt{(2 \times \rho_{NIR} + 1)^2 - 8 \times (\rho_{NIR} - \rho_{RED})}}{2}$
Modified Triangular Vegetation Index	$MTVI = 1,2 \times (1,2 \times (\rho_{RED} - \rho_{BLUE}) - 2,5 \times (\rho_{GREEN} - \rho_{BLUE}))$
Normalized Burn Ratio	$NBR = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{SWIR})}{(\rho_{NIR} + \rho_{SWIR})}$
Normalized Difference Infrared Index	$NDII = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{SWIR})}{(\rho_{NIR} + \rho_{SWIR})}$
Normalized Difference Moisture Index	$NDMI = \frac{(\rho_{RED} - \rho_{NIR})}{(\rho_{RED} + \rho_{NIR})}$

<i>Índice</i>	<i>Cálculo - Fórmula</i>
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})}$
Optimized Soil Adjusted Vegetation Index	$OSAVI = \frac{1,16 \times (\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + 0,16}$
Perpendicular Vegetation Index	$PVI = \frac{\rho_{NIR} - 1,163 \times \rho_{RED} - 0,017}{\sqrt{1 + 1,163^2}}$
Renormalized Difference Vegetation Index	$RDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})^{\frac{1}{2}}}$
Simple Ratio	$SR = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}}$
Soil Adjusted Vegetation Index	$SAVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED}) \times (1 + L)}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L)}$
Transformed Chlorophyll Absorption Reflectance Index	$TCARI = 3 \times \left((\rho_{VRE} - \rho_{RED}) - 0,2 \times (\rho_{VRE} - \rho_{GREEN}) \times \left(\frac{\rho_{VRE}}{\rho_{RED}} \right) \right)$
Wide Dynamic Range Vegetation Index	$WDRVI = \frac{\alpha \times \rho_{VRE} - \rho_{RED}}{\alpha \times \rho_{VRE} + \rho_{RED}}$

	<i>Índice</i>	<i>Cálculo - Fórmula</i>
RED EDGE	Chlorophyll Index Red-edge	$CI_{re} = \frac{B7}{B5} - 1$
	MERIS Terrestrial Chlorophyll Index	$MTCI = \frac{B6 - B5}{B5 - \rho_{RED}}$
	Modified Simple Ratio	$MSR_{re} = \frac{\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{VRE}} - 1}{\sqrt{\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{VRE}} + 1}}$

RED EDGE	Índice	Cálculo - Fórmula
	Normalized Difference Red-edge 1	$\text{NDre1} = \frac{B6 - B5}{B6 + B5}$
	Normalized Difference Red-edge 2	$\text{NDre2} = \frac{B7 - B5}{B7 + B5}$
	Normalized Difference Vegetation Index Red-edge	$\text{NDVIre} = \frac{\rho\text{NIR} - \rho\text{VRE}}{\rho\text{NIR} + \rho\text{VRE}}$
	Plant Senescence Reflectance Index	$\text{PSRI} = \frac{\rho\text{RED} - \rho\text{GREEN}}{\rho\text{VRE}}$

3.2.4 Cálculo da biomassa

Um dos métodos para a quantificação da fitomassa de formações vegetais consiste na colheita de todo o material vegetal presente numa determinada área. Este método não é de fácil aplicação em florestas, ecossistemas complexos e com plantas de elevado porte e volume. Aplica-se, normalmente, a comunidades de plantas herbáceas ou arbustivas de baixo porte (Ren et al., 2018). Em florestas geralmente são usados métodos indiretos que consistem na elaboração de equações que relacionam a fitomassa e variáveis de medida fácil e rápida como por exemplo a altura total da árvore ou o diâmetro do tronco (Faías, 2009).

Para as principais espécies florestais portuguesas há vários estudos que elaboraram equações (modelos alométricos) que relacionam a biomassa com variáveis das árvores. Estes modelos variam consoante as espécies. A biomassa é calculada para diferentes componentes: tronco, casca, ramos, agulhas e raízes. A biomassa total da árvore é obtida pela soma das diferentes componentes. No entanto, no presente estudo não foi necessário calcular a biomassa radicular uma vez que apenas a componente aérea interage com a radiação solar e assim poderá encontrar-se relacionada com índices espectrais de vegetação.

As equações usadas no presente estudo foram retiradas de Tomé et al. (2007).

Para o caso do Pinheiro-bravo o modelo usado para calcular a biomassa das componentes tronco e casca (Tomé et al., 2007) é o seguinte (equação (20)):

$$(20) Y = \beta_0 \times D^{\beta_1} \times H^{\beta_2}$$

Onde:

Y representa a biomassa expressa em kg
D é o diâmetro da árvore medido a 1,3 m de altura (cm)
H é a altura da árvore (m)
 β_0 , β_1 e β_2 são coeficientes de regressão (Tabela 3.2)

Também para o Pinheiro-bravo o modelo utilizado para o cálculo da biomassa das componentes ramos e agulhas é dado pela expressão (equação (21)):

$$(21) Y = \beta_0 \times D^{\beta_1} \times \left(\frac{H}{D}\right)^{\beta_2}$$

Onde

Y representa a biomassa expressa em kg
D é o diâmetro da árvore medido a 1,3 m de altura (cm)
H é a altura da árvore (m)
 β_0 , β_1 e β_2 são coeficientes de regressão (Tabela 3.2)

Tabela 3.2 - Coeficientes de regressão para o Pinheiro-bravo (Tomé et al., 2007)

Componente	β_0	β_1	β_2
<i>Tronco (1)</i>	0,0146	1,94687	1,106577
<i>Casca (2)</i>	0,0114	1,8728	0,6694
<i>Ramos (3)</i>	0,00308	2,75761	-0,39381
<i>Agulhas (4)</i>	0,09980	1,39252	-0,71962

$$Biomassa\ total\ aérea\ (kg) = (1) + (2) + (3) + (4)$$

Para o cálculo da biomassa do Pinheiro-mansoso foram usadas três equações, segundo Tomé et al., (2007). Para estimar a biomassa das componentes lenho e casca, a equação utilizada foi a seguinte (equação (22)):

$$(22) Y = \beta_0 \times C^{\beta_1} \times H^{\beta_2}$$

Onde:

Y representa a biomassa expressa em kg
C é a circunferência da árvore medida a 1,3 m de altura (cm)
H é a altura da árvore (m)
 β_0 , β_1 e β_2 são coeficientes de regressão (Tabela 3.3)

Para a componente ramos foi usada a equação (23):

$$(23) Y = \beta_0 \times C^{\beta_1}$$

Onde:

Y representa a biomassa expressa em kg
C é a circunferência da árvore medida a 1,3 m de altura (cm)
H é a altura da árvore (m)
 β_0 e β_1 são coeficientes de regressão (Tabela 3.3)

A equação (24) utilizada para a componente folhas é:

$$(24) Y = \beta_0 \times C^{\beta_1} \times \left(\frac{H}{D}\right)^{\beta_2}$$

Onde:

Y representa a biomassa expressa em kg
C é a circunferência da árvore medida a 1,3 m de altura (cm)
H é a altura da árvore (m)
 β_0 , β_1 e β_2 são coeficientes de regressão (Tabela 3.3)

Tabela 3.3 - Coeficientes de regressão para o Pinheiro-manso (Tomé et al., 2007)

Componente	β_0	β_1	β_2
<i>Lenho (1)</i>	18,8544	1,6755	0,9485
<i>Casca (2)</i>	8,0810	1,5549	0,4702
<i>Ramos (3)</i>	184,9365	3,0344	-
<i>Folhas (4)</i>	22,2677	1,7607	-0,5003

$$Biomassa\ total\ aérea\ (kg) = (1) + (2) + (3) + (4)$$

Para estimar a biomassa do sobreiro foi usada a seguinte (equação (25)):

$$(25) Y = \beta_0 \times C^{\beta_1}$$

Onde:

Y representa a biomassa expressa em kg
C é a circunferência da árvore medida a 1,3 m de altura (cm)
 β_0 e β_1 são coeficientes de regressão (Tabela 3.4)

Tabela 3.4 - Coeficientes de regressão para o Sobreiro (ICNF, 2010; Tomé et al., 2007)

Componente	β_0	β_1
<i>Lenho no tronco, pernas e braças (1)</i>	284,2881	2,9646
<i>Ramos (2)</i>	108,5769	1,3464
<i>Folhas (3)</i>	22,5773	1,1690

$$Biomassa\ total\ aérea\ (kg) = (1) + (2) + (3)$$

Assim, foi estimado o valor da biomassa aérea para cada árvore. Em seguida foi calculado o valor da biomassa para cada parcela somando o contributo de todas as árvores presentes. Posteriormente foi determinada a biomassa por unidade de área (m^2) por forma a uniformizar os dados uma vez que as parcelas variam de dimensão consoante a espécie de árvore dominante.

Para cada parcela foi ainda calculada a densidade, expressa pelo número de árvores por hectare pois esta variável permite realizar uma apreciação da ocupação da parcela, podendo ser útil para a interpretação dos resultados.

Para o caso do Pinheiro-bravo foi ainda estudada a relação entre a biomassa total de cada árvore e o diâmetro a altura de peito (DAP) ou a altura e comparada com dados de Faias (2009) para comparação dos dados obtidos com dados provenientes de bases de dados mais alargadas.

3.2.5 Modelos de Regressão

Em seguida foram desenvolvidas regressões lineares (método dos mínimos quadrados) e não lineares (potência e exponencial) entre a biomassa obtida com os dados de campo e os valores dos IV, no *Paleontological Statistics* (Past) versão 3.26b (Hammer et al., 2001). Foram selecionados os melhores modelos com base no critério *Akaike Information Criterion* (AIC). Atualmente há muitos critérios para avaliação de modelos de regressão. Foi escolhido o AIC pois tem vindo a ser muito usado em estudos de ecologia (Symonds & Moussalli, 2011).

Posteriormente, os melhores modelos de regressão linear ($R^2 > 0,60$) foram validados no respeitante ao: a) coeficiente de determinação, b) coeficientes do modelo de regressão e c) pressupostos do modelo de regressão linear. O pressuposto da homogeneidade dos resíduos foi testado através da análise visual dos gráficos dos resíduos versus os valores estimados e através do teste de Breusch-Pagan. O pressuposto da independência dos resíduos foi verificado por meio do teste de Durbin-Watson. Dentro do vasto número de testes para validar o pressuposto da normalidade dos resíduos foram usados os testes: Shapiro-Wilk, Lilliefors e Anderson-Darling, disponíveis no Past. A normalidade foi ainda verificada através da inspeção visual do gráfico de Probabilidade Normal (Normal Probability Plot). Foi testada a existência de *outliers* (3 x Desvio-padrão) (Maroco, 2007). Em alguns casos foi tentada a transformação de variáveis por forma a que os pressupostos da regressão linear fossem válidos (Maroco, 2007).

O nível de significância usado nos testes foi de $p < 0,001$.

Dos modelos válidos foram selecionados os melhores com base no coeficiente de determinação e erro padrão da estimativa (Zhang et al., 2019).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Identificação de áreas homogêneas e sua assinatura espectral

Apresenta-se na Figura 4.1 o mapa resultante da classificação com 6 classes e sua relação com zonas de vários graus de densidade do coberto vegetal. Foram identificadas seis classes: desde zonas com valor nulo da biomassa (como estradas e caminhos) até zonas de alto valor da biomassa, correspondentes a zonas com elevado número de árvores e/ou árvores de grande porte.

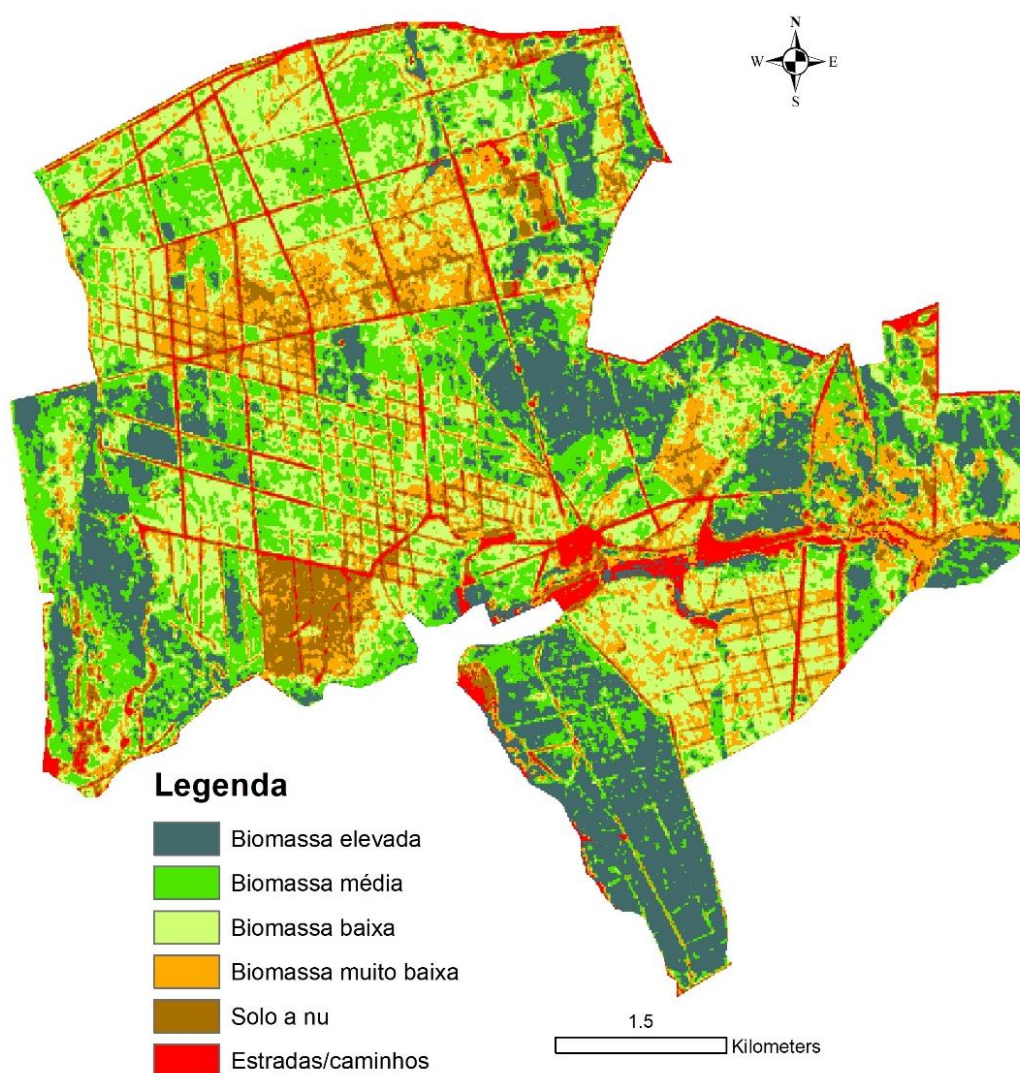


Figura 4.1 - Resultado da classificação *ISO Cluster Unsupervised Classification* da imagem de 3 de Maio

A Figura 4.2 apresenta as assinaturas espectrais referentes às várias classes para as 3 datas: 3 Maio, 30 de Maio e 21 de Agosto.

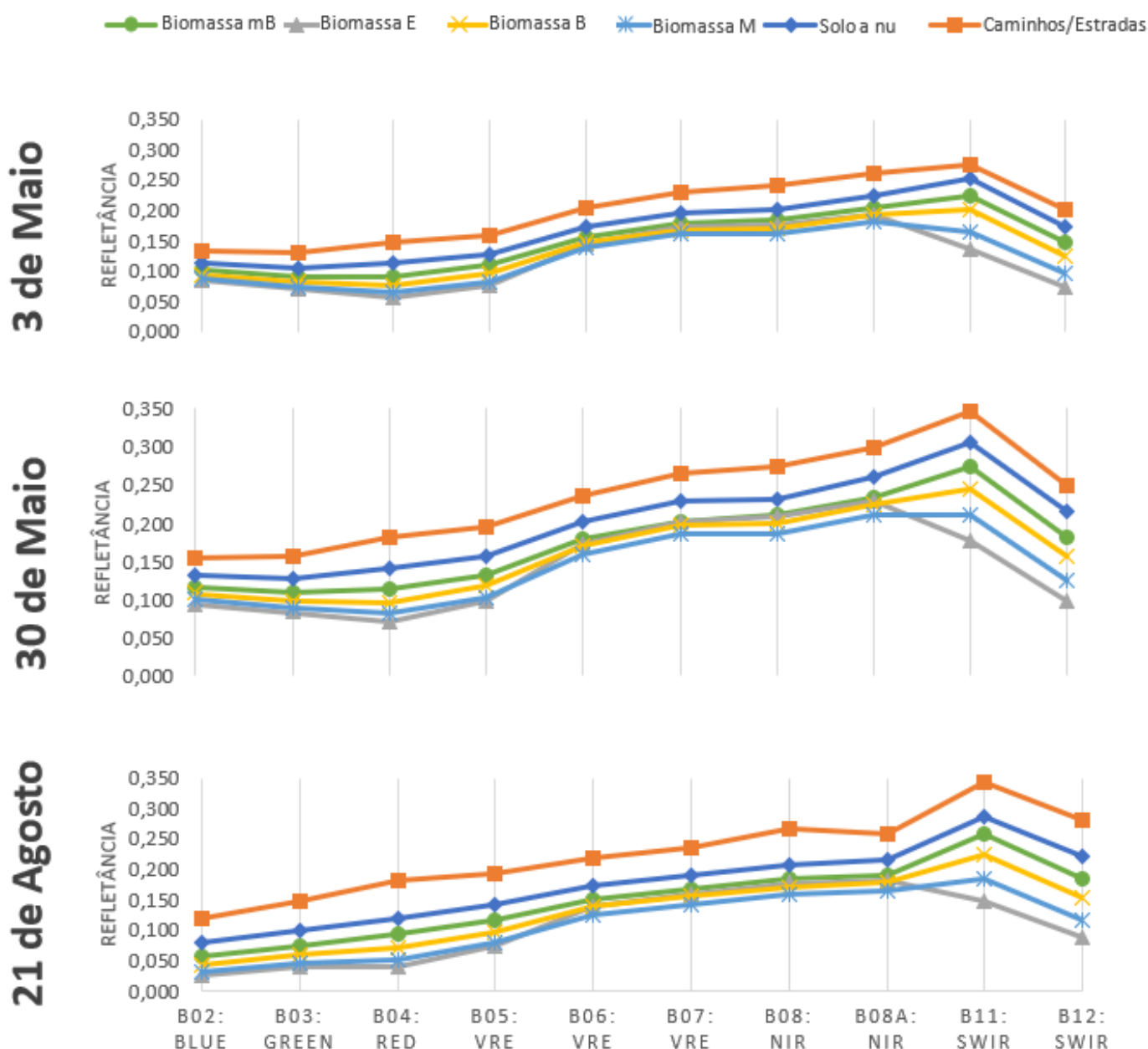


Figura 4.2 - Assinaturas espectrais referentes às 6 classes: 3 Maio, 30 de Maio e 21 de Agosto. Onde B-baixa, E-elevada, M-média, mB-muito baixa.

Pode observar-se que os valores da refletância referentes à classe estradas/caminhos e solo a nu são sempre superiores aos valores das restantes classes, nas três datas.

As classes correspondentes a vegetação têm um comportamento semelhante entre si e idêntico em todas as datas (excetua-se a classe correspondente a biomassa elevada que tem um comportamento distinto do das outras classes nas bandas 11 e 12 (SWIR)). Assim, a refletância é mais baixa nas bandas do visível (B02, B03, B04), aumenta na região espectral do RE (B05, B06 e B07) e aumenta na região do infravermelho próximo (B08 e B08a). A refletância aumenta ainda na banda B11 do SWIR, diminuindo na banda B12 desta região espectral. Por

outro lado, observa-se que, à medida que a quantidade de vegetação diminui há um aumento da refletância (as curvas respectivas estão cada vez mais elevadas no gráfico).

Não foi efetuada a correção atmosférica das imagens, pelo que os valores no visível, especialmente no azul, estão influenciados pela atmosfera. Mesmo assim, nota-se, nas classes correspondentes a vegetação, um decréscimo da refletância do verde para o vermelho, devido à absorção da radiação do vermelho pelos pigmentos fotossintéticos. Este fenómeno não se verifica para as classes de estradas/caminhos e solo a nu, pelo que, para estas classes, não ocorre o referido decréscimo.

Nota-se que no RE e no infravermelho próximo os valores da refletância aumentam em relação ao visível, o que seria de esperar, uma vez que a radiação sofre reflexões múltiplas no interior das folhas das plantas. No SWIR observa-se uma diferença entre o comportamento da classe com biomassa mais elevada em relação ao das restantes classes. Para estas a refletância diminui apenas na B12. Para a biomassa mais elevada nota-se uma diminuição na B11 e B12.

No SWIR o comportamento da vegetação é determinado pela presença da água nos tecidos foliares, sendo o pico de absorção mais pronunciado para a banda B12. A classe de biomassa mais elevada, muito possivelmente corresponderá a árvores de maior porte, com raízes mais profundas e, portanto, com maior disponibilidade hídrica. Consequentemente, a ela corresponderá uma diminuição da refletância nas bandas B11 e B12. As restantes classes, de menor biomassa, estarão relacionadas com árvores de menor porte, com menor disponibilidade hídrica, resultando daí, uma diminuição da refletância apenas na banda B12.

As assinaturas espectrais referentes a 30 de Maio (Figura 4.2) são praticamente semelhantes às descritas. Excetua-se o caso da vegetação de biomassa muito baixa, cuja curva de refletância não apresenta um decréscimo na passagem do vermelho para o verde, fato que poderá ser explicado pelo baixo valor da precipitação ocorrido durante o mês de Maio.

A Figura 4.2 mostra as assinaturas espectrais referentes a 21 de Agosto. O padrão, para as bandas RE, NIR e SWIR é, de modo geral, semelhante aos anteriores. Ocorrem mudanças sim na região do visível. Devido à combinação de ausência de precipitação com temperaturas elevadas (como é típico do verão no clima mediterrânico) a vegetação, na sua maioria, encontra-se num estado não ativo. Ou seja, a atividade fotossintética é reduzida, o que resulta numa fraca absorção da radiação do vermelho, fato que se traduz, nas curvas de refletância, por um aumento dos valores do verde para o vermelho.

4.2 Amostragem no campo

O número de parcelas amostradas foi de 17 (área total de 9 458 m²), o que corresponde a 0,025% da área de estudo.

No total foram amostradas 207 árvores, sendo a maior parte Pinheiros-bravos (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Número total de árvores amostradas, por espécie

TOTAL		
<i>Pinheiro-manso</i>	<i>Pinheiro-bravo</i>	<i>Sobreiro</i>
18	187	2
207		

Duas parcelas (5 e 15) tinham apenas Pinheiros-mansos (Figura 4.3). Há 9 parcelas apenas com Pinheiros-bravos. Os exemplares de Sobreiros (2 indivíduos) apareceram na mesma parcela (3).

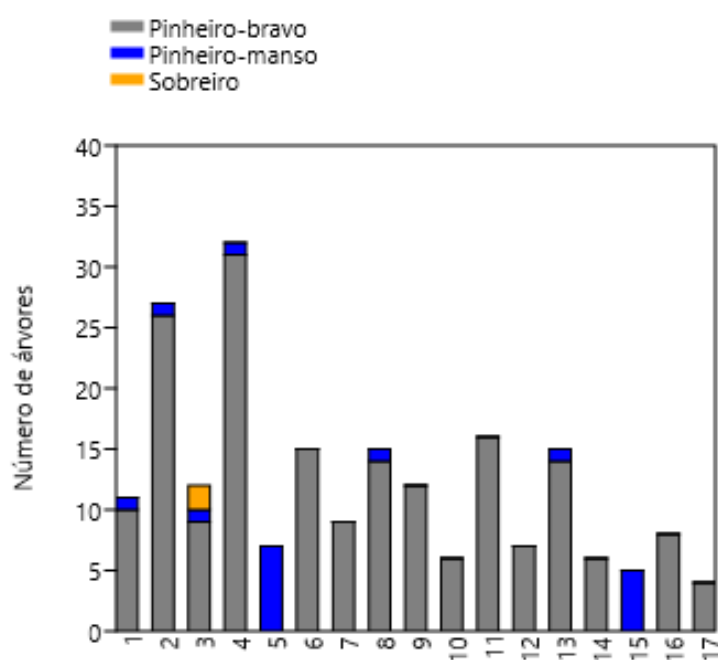


Figura 4.3 – Número de árvores amostradas por cada espécie para as várias parcelas

A densidade das parcelas amostradas varia entre 50 e 640 árvores ha⁻¹ (Figura 4.4).

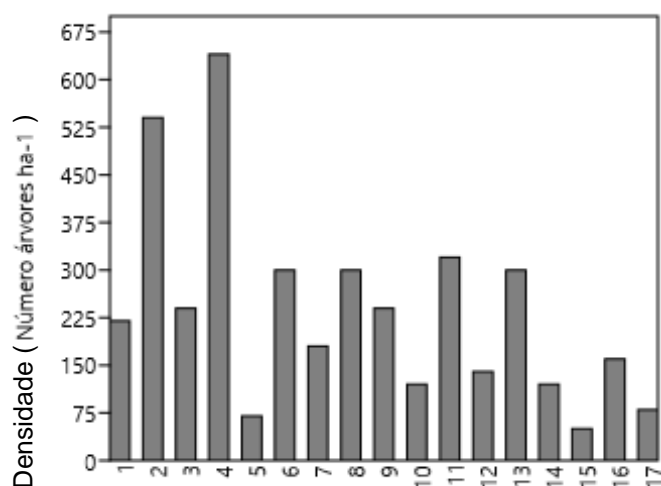


Figura 4.4 - Densidade das parcelas

Apresentam-se na Figura 4.5 os valores da biomassa das parcelas expressa em toneladas por hectare (em anexo encontram-se os valores discriminados por espécie e parcela).

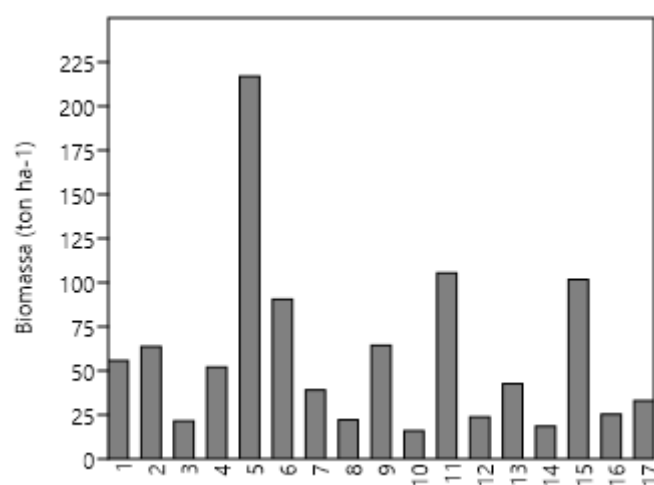


Figura 4.5 - Biomassa das parcelas

O valor mínimo de biomassa é de 16 ton ha⁻¹ (Parcela 10) e o máximo 217 ton ha⁻¹ (Parcela 5), sendo o valor médio 59 ton ha⁻¹. O desvio-padrão é de 50 árvores/ha. A parcela com valor mais elevado da biomassa corresponde a uma parcela com dominância de Pinheiro-manso (5). A outra parcela também com dominância desta espécie (15) tem também elevado valor da biomassa. A parcela 11 tem no sub-coberto uma elevada densidade de acácias (observação obtida no campo), o que poderá explicar a sua elevada biomassa.

Apresentam-se na Figura 4.6 os gráficos da relação entre: (a) a biomassa de cada árvore e o DAP e (b) a biomassa e a altura, apenas para o Pinheiro-bravo. Os dados evidenciam uma relação curvilínea e seguem um padrão normal para esta espécie (Faías, 2009).

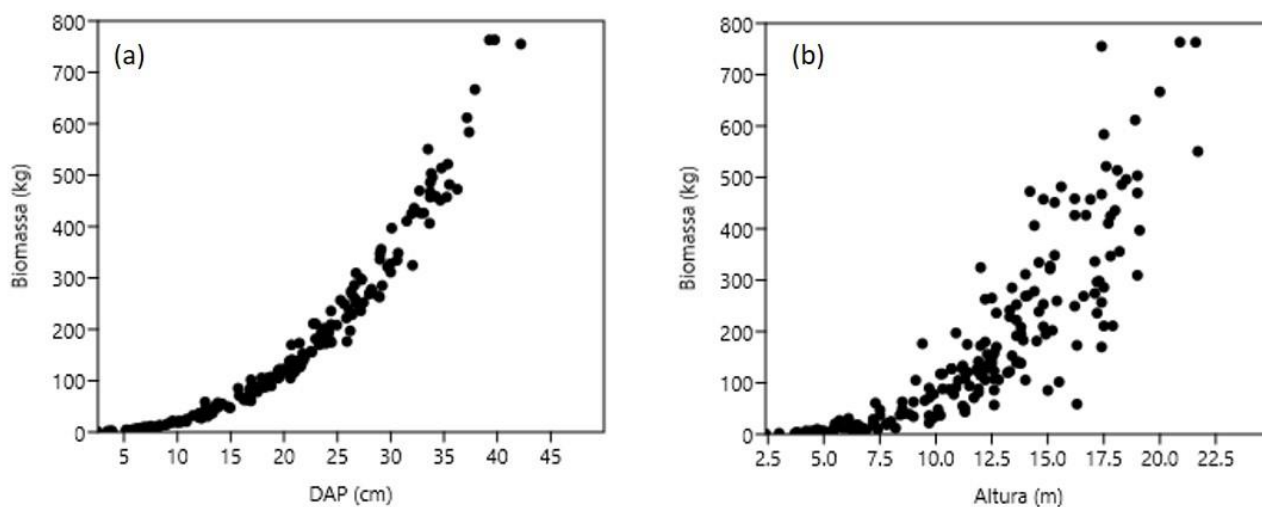


Figura 4.6 - Relação entre (a) a biomassa de cada árvore e o seu DAP; (b) a biomassa e a altura, apenas para o Pinheiro-bravo

4.3 Cálculo de Índices de Vegetação

Na Tabela 4.2 apresentam-se os valores dos índices espectrais de vegetação calculados para as várias parcelas.

Tabela 4.2 - Valores dos índices espectrais de vegetação para as parcelas

Índices	Parcelas																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Clre	0,52	0,85	1,01	1,06	1,62	0,75	0,59	0,52	0,78	0,24	1,55	0,59	1,03	0,32	0,93	0,53	0,66
DVI (B8)	0,11	0,11	0,12	0,13	0,16	0,10	0,10	0,09	0,11	0,08	0,13	0,09	0,11	0,08	0,12	0,10	0,10
DVI (B8a)	0,12	0,12	0,12	0,14	0,17	0,12	0,10	0,10	0,12	0,10	0,13	0,10	0,11	0,10	0,13	0,11	0,12
EVI	0,21	0,22	0,24	0,26	0,34	0,21	0,19	0,18	0,22	0,14	0,26	0,19	0,23	0,16	0,23	0,20	0,20
GNDVI (B8)	0,48	0,57	0,59	0,61	0,68	0,54	0,48	0,47	0,56	0,34	0,69	0,50	0,60	0,40	0,59	0,51	0,51
GNDVI (B8a)	0,50	0,59	0,61	0,62	0,68	0,58	0,48	0,50	0,59	0,39	0,71	0,52	0,62	0,44	0,61	0,54	0,53
MSAVI	0,19	0,19	0,21	0,23	0,31	0,18	0,17	0,16	0,19	0,12	0,23	0,16	0,20	0,14	0,21	0,17	0,18
MSRre	0,38	0,55	0,70	0,70	0,96	0,48	0,46	0,41	0,53	0,18	0,88	0,45	0,68	0,24	0,62	0,39	0,45
MSRren	0,42	0,60	0,74	0,75	0,97	0,60	0,47	0,47	0,60	0,26	0,94	0,50	0,72	0,32	0,69	0,46	0,52
MTCI	1,16	1,49	1,87	2,08	2,07	1,51	1,89	1,37	1,53	0,57	2,34	1,40	1,71	0,82	2,17	1,08	1,33
MTVI	-0,01	-0,02	-0,02	-0,01	-0,05	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	-0,02	-0,01	-0,02	0,00	-0,01	-0,01	-0,01
NBR	0,03	0,21	0,25	0,23	0,54	0,08	0,05	0,05	0,16	-0,13	0,44	0,07	0,22	-0,11	0,20	-0,01	0,02
NDII (B8a e B11)	-0,10	0,02	0,02	0,03	0,27	-0,06	-0,13	-0,11	-0,03	-0,20	0,19	-0,11	-0,01	-0,20	0,02	-0,15	-0,14
NDII (B8a e B12)	0,05	0,24	0,27	0,25	0,54	0,14	0,06	0,08	0,20	-0,08	0,46	0,10	0,24	-0,07	0,24	0,03	0,06

	Parcelas																
Índices	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
NDII(B8 e B11)	-0,12	-0,01	-0,01	0,01	0,27	-0,12	-0,14	-0,14	-0,07	-0,25	0,17	-0,14	-0,02	-0,25	-0,02	-0,19	-0,18
NDMI (B8)	-0,40	-0,54	-0,58	-0,57	-0,77	-0,47	-0,39	-0,38	-0,50	-0,25	-0,69	-0,42	-0,60	-0,31	-0,51	-0,43	-0,44
NDMI (B8a)	-0,42	-0,56	-0,59	-0,59	-0,77	-0,52	-0,40	-0,41	-0,53	-0,30	-0,71	-0,44	-0,61	-0,36	-0,54	-0,46	-0,47
NDre1	0,15	0,24	0,27	0,28	0,39	0,21	0,18	0,15	0,22	0,06	0,37	0,17	0,27	0,10	0,26	0,16	0,17
NDre2	0,21	0,30	0,34	0,35	0,45	0,27	0,23	0,21	0,28	0,11	0,44	0,23	0,34	0,14	0,32	0,21	0,25
NDVI (B8)	0,40	0,54	0,58	0,57	0,77	0,47	0,39	0,38	0,50	0,25	0,69	0,42	0,60	0,31	0,51	0,43	0,44
NDVI (B8a)	0,42	0,56	0,59	0,59	0,77	0,52	0,40	0,41	0,53	0,30	0,71	0,44	0,61	0,36	0,54	0,46	0,47
NDVire1	0,24	0,32	0,39	0,39	0,49	0,28	0,27	0,25	0,31	0,12	0,46	0,27	0,38	0,16	0,35	0,24	0,27
NDVire1n	0,26	0,34	0,40	0,41	0,49	0,34	0,28	0,28	0,34	0,17	0,48	0,30	0,40	0,20	0,39	0,28	0,31
NDVire2	0,09	0,09	0,13	0,12	0,11	0,08	0,10	0,11	0,10	0,06	0,10	0,11	0,12	0,05	0,10	0,08	0,10
NDVire2n	0,11	0,12	0,15	0,14	0,12	0,15	0,11	0,14	0,13	0,10	0,13	0,14	0,14	0,10	0,14	0,12	0,14
NDVire3	0,03	0,02	0,06	0,05	0,05	0,01	0,05	0,05	0,03	0,01	0,03	0,05	0,05	0,02	0,04	0,03	0,03
NDVire3n	0,05	0,05	0,08	0,07	0,05	0,08	0,06	0,08	0,07	0,06	0,05	0,07	0,07	0,07	0,08	0,07	0,07
OSAVI (B8)	0,30	0,35	0,37	0,38	0,51	0,31	0,28	0,27	0,34	0,19	0,43	0,28	0,37	0,23	0,35	0,29	0,30
OSAVI (B8a)	0,31	0,37	0,39	0,40	0,51	0,36	0,29	0,29	0,36	0,23	0,44	0,30	0,38	0,26	0,38	0,33	0,33
PSRI	0,09	0,04	0,02	0,04	-0,08	0,07	0,10	0,11	0,06	0,12	0,00	0,09	0,01	0,11	0,08	0,08	0,08
PVI (B8)	0,05	0,05	0,06	0,07	0,09	0,05	0,05	0,04	0,05	0,03	0,07	0,04	0,05	0,03	0,06	0,05	0,05
PVI (B8a)	0,06	0,06	0,07	0,07	0,09	0,06	0,05	0,05	0,06	0,04	0,07	0,05	0,06	0,04	0,07	0,06	0,06
RDVI	0,21	0,24	0,26	0,27	0,36	0,22	0,20	0,19	0,23	0,14	0,29	0,20	0,25	0,16	0,24	0,21	0,21
SAVI	0,22	0,23	0,25	0,26	0,34	0,21	0,20	0,19	0,23	0,14	0,28	0,19	0,24	0,16	0,24	0,20	0,21
SR	2,35	3,32	3,72	3,65	7,79	2,75	2,28	2,25	3,03	1,68	5,48	2,45	3,97	1,91	3,10	2,51	2,56
TCARI (B5)	0,07	0,06	0,05	0,06	0,08	0,06	0,04	0,04	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,06	0,06
TCARI (B6)	0,13	0,10	0,10	0,11	-0,05	0,11	0,11	0,10	0,11	0,10	0,03	0,10	0,08	0,11	0,11	0,11	0,11
TCARI (B7)	0,15	0,10	0,10	0,10	-0,13	0,12	0,13	0,12	0,11	0,12	-0,01	0,12	0,08	0,12	0,11	0,12	0,13

A Tabela 4.3 apresenta os valores do critério AIC das regressões (linear, potência exponencial) desenvolvidas entre os índices e a biomassa.

Tabela 4.3 - Valores do critério AIC para modelos lineares e não lineares

<i>Índices de Vegetação</i>	<i>Linear</i>	<i>Potência</i>	<i>Exponencial</i>
Clre	5,79	8,74	8,78
DVI (B8)	4,86	7,85	7,85
DVI (B8a)	4,86	7,85	7,85
EVI	4,87	7,86	7,86
GNDVI (B8)	4,93	7,90	7,92
GNDVI (B8a)	4,92	7,89	7,91
MSAVI	4,87	7,85	7,85
MSRre	5,18	8,16	8,17
MSRren	5,14	8,11	8,13
MTCI	4,86	-	-
MTVI	4,86	-	-
NBR	5,05	-	-
NDII (B8a e B11)	4,94	-	-
NDII (B8a e B12)	5,02	-	-
NDII (B8 e B11)	4,95	-	-
NDMI (B8)	4,98	-	-
NDMI (B8a)	4,96	-	-
NDre1	4,91	7,89	7,90
NDre2	4,92	7,90	7,91
NDVI (B8)	4,98	7,96	7,97
NDVI (B8a)	4,96	7,94	7,95
NDVIre1	4,94	7,92	7,92
NDVIre1n	4,92	7,90	7,91
NDVIre2	4,86	7,85	7,85
NDVIre2n	4,86	7,85	7,85
NDVIre3	4,86	7,85	7,85
NDVIre3n	4,86	7,85	7,85
OSAVI (B8)	4,89	7,88	7,88
OSAVI (B8a)	4,88	7,87	7,87
PSRI	4,88	-	-
PVI (B8)	4,86	7,85	7,85
PVI (B8a)	4,86	7,85	7,85
RDVI	4,87	7,86	7,86
SAVI	4,87	7,86	7,86
SR	5,14	-	-
TCARI (B5)	4,86	7,85	7,85
TCARI (B6)	4,87	-	-
TCARI (B7)	4,88	-	-

Pode observar-se que as regressões lineares possuem os valores mais baixos de AIC, o que indica serem os melhores modelos de regressão.

A Tabela 4.4 mostra os valores do R^2 dos modelos lineares desenvolvidos.

Tabela 4.4 - Valores do R^2 dos modelos lineares desenvolvidos

<i>Índices de Vegetação</i>	<i>R^2</i>
Clre	0,60
DVI (B8)	0,72
DVI (B8a)	0,78
EVI	0,70
GNDVI (B8)	0,45
GNDVI (B8a)	0,46
MSAVI	0,71
MSRre	0,52
MSRren	0,53
MTCI	0,33
MTVI	0,64
NBR	0,61
NDII (B8a e B11)	0,70
NDII (B8a e B12)	0,63
NDII (B8 e B11)	0,67
NDMI (B8)	0,55
NDMI (B8a)	0,57
NDre1	0,58
NDre2	0,53
NDVI (B8)	0,55
NDVI (B8a)	0,57
NDVire1	0,47
NDVire1n	0,49
NDVire2	0,04
NDVire2n	0,00
NDVire3	0,00
NDVire3n	0,13
OSAVI (B8)	0,63
OSAVI (B8a)	0,66
PSRI	0,57
PVI (B8)	0,70
PVI (B8a)	0,76
RDVI	0,65
SAVI	0,68
SR	0,73
TCARI (B5)	0,18
TCARI (B6)	0,65
TCARI (B7)	0,71

O valor do coeficiente de determinação varia entre 0,00, no caso do NDVIre2n, e 0,78 para o caso do DVI (8a).

Foram escolhidos os modelos com valor de $R^2 > 0.60$ para se proceder à validação e detecção de *outliers* (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 - Tabela de validação e detecção de outliers para os modelos lineares com $R^2 > 0.6$. Todas as regressões são significativas a um nível de significância de 0.01.

Índices de vegetação	R^2	Validação R	Validação Declive	Validação Ordenada	Erro Padrão da Estimativa	Homocedasticidade	Independência	Modelos			Ouliers
								Shapiro-Wilk	Lilliefors	Anderson-Darling	
DVI (B8a)	0,78	S	S	S	0,008	S	S	N	S	N	N
Raiz quadrada DVI (B8a)	0,76	S	S	S	0,012	S	S	S	S	S	N
PVI (B8a)	0,76	S	S	S	0,007	S	S	S	S	S	N
SR (B8)	0,73	S	S	S	0,801	S	S	S	S	S	N
DVI (B8)	0,72	S	S	S	0,011	S	S	S	N	N	N
MSAVI (B8)	0,72	S	S	S	0,023	S	S	S	S	S	N
TCARI (B7)	0,71	S	S	S	0,038	N	S	S	S	S	N
NDII (B8a, B11)	0,70	S	S	S	0,073	S	S	S	S	S	N
EVI (B8)	0,70	S	S	S	0,025	S	S	S	S	S	N
PVI (B8)	0,70	S	S	S	0,009	S	S	S	S	S	N
SAVI (B8)	0,68	S	S	S	0,027	S	S	S	S	S	N
NDII (B8, B11)	0,67	S	S	S	0,081	S	S	S	S	S	N
OSAVI (B8a)	0,66	S	S	S	0,041	S	S	S	S	S	N
TCARI (B6)	0,65	S	S	S	0,025	S	S	S	S	S	N
RDVI (B8)	0,65	S	S	S	0,031	S	S	S	S	S	N
MTVI	0,64	S	S	N	0,007	S	S	S	S	S	N
OSAVI (B8)	0,63	S	S	S	0,047	S	S	S	S	S	N
NDII (B8a, B12)	0,63	S	S	N	0,104	S	S	S	S	S	N
NBR (B8)	0,61	S	S	N	0,113	S	S	S	S	S	N

Onde:

S: sim

N: não

Em nenhum caso foram detetados *outliers*. Todos os modelos são estatisticamente significativos. A maior parte dos modelos são válidos (no respeitante à validade dos coeficientes de regressão, homocedasticidade, normalidade dos resíduos). Apenas um dos modelos revelou

problemas quanto à homocedasticidade (TCARI (B7)) e dois modelos no respeitante à normalidade dos resíduos (DVI (B8a) e DVI (B8)). A aplicação da raiz quadrada aos valores de entrada do modelo DVI (B8a) permitiu resolver o problema relativo à normalidade dos resíduos.

Os modelos com R^2 mais elevado ($>0,8$) são os modelos DVI (B8a), raiz quadrada DVI (B8a) e PVI (B8a) ou seja, índices que usam as bandas espectrais do vermelho e do NIR (banda estreita). O Erro Padrão da Estimativa é semelhante para os índices DVI (B8a) e PVI (B8a) e um pouco superior para o modelo que usa a raiz quadrada.

Estes índices, ao usarem as bandas do vermelho e do NIR, correlacionam-se com características da vegetação, na medida em que a clorofila absorve a radiação de comprimento de onda do vermelho enquanto que a estrutura interna das folhas reflete a radiação do infravermelho próximo. Se os sensores a bordo de satélites forem “sintonizados” para estes comprimentos de onda, podem determinar a quantidade de vegetação presente (Liu et al., 2004).

O centro das Bandas 8 e 8a é bastante semelhante (842 e 865 nm, respetivamente), no entanto a Banda 8a é sensível à radiação de uma mais estreita faixa de comprimento de onda (855-875 nm) em comparação à Banda 8 (785-900 nm), facto que limita a influência negativa da atmosfera, em especial do vapor de água, para o sinal espectral (ESA, 2015). De facto, observa-se sempre um R^2 superior para os índices que usam a banda mais estreita. Esta diferença é mais elevada no caso do DVI e PVI, sendo pequena para os índices OSAVI, NDVI, NDMI e GNDVI. Zhang et al (2019) encontraram valores do coeficiente de determinação superiores usando a Banda 8a em comparação com a Banda 8, na determinação do índice de Área Foliar e do teor em clorofila de copa de plantas de milho.

Por outro lado, a Banda 8a tem resolução espacial inferior (20 m) em comparação com a banda 8 (10 m) o que poderá revelar-se limitante em alguns estudos que necessitem de maior pormenor. No entanto, há algumas técnicas que estão a ser desenvolvidas e que permitirão melhorar a resolução das imagens com 10 m de resolução espacial (Zhang et al. 2019).

O SR, calculado a partir da banda do vermelho e da banda 8 (NIR banda larga), tem também um R^2 elevado (0,73). No entanto, possui um Erro Padrão da Estimativa muito elevado. O SR calculado a partir do NIR banda estreita (valores não apresentados) possui valores muito semelhantes aos do SR banda larga.

O NDVI não se revelou um bom indicador da biomassa no presente estudo ($R^2=0,57$ usando a Banda 8a e $R^2=0,55$ usando a Banda 8). Apesar deste IV ser um dos índices espectrais mais usados para a determinação da biomassa (Kumar et al., 2018, Ma et al., 2018), é muito suscetível a influências externas como perturbações atmosféricas resultantes da presença de aerossóis (Liu et al., 2004). Além disso, tem problemas de saturação para elevados valores da biomassa/densidade/grau de cobertura das formações vegetais, o que aconteceu provavelmente com a inclusão de parcelas de maior biomassa. O SR não tem esta limitação e, no presente estudo, corresponde-lhe um dos mais elevados valores do coeficiente de determinação. No entanto, o Erro Parão da Estimativa dos modelos que lhe estão associados é elevado, o que reduz a sua utilidade para estimar a biomassa.

Ao EVI corresponde um coeficiente de determinação elevado ($R^2=0,70$), um pouco mais elevado do que aquele referente ao NDVI (0,57 ou 0,55 consoante a banda do NIR usada). O

EVI foi proposto como alternativa ao NDVI, justamente em casos de elevada densidade do coberto vegetal, quando ocorre saturação deste último IV (Pettorelli et al., 2005). O fato do EVI usar a refletância no azul para corrigir a influência da atmosfera também poderá ter contribuído para o seu melhor desempenho na avaliação da biomassa.

Relativamente aos índices desenvolvidos para terem em conta a influência do solo o MSAVI apresenta R^2 superior (0,71), sendo seguido pelo SAVI (0,68), OSAVI com a Banda 8a (0,66) e OSAVI com a Banda 8 (0,63). Os dois últimos índices são índices normalizados. Não foi encontrada razão para estas diferenças, para tal será necessária uma análise mais aprofundada.

O NBR, que usa bandas do NIR e do SWIR, tem um R^2 de 0,61. Este índice tem tido aplicação sobretudo na deteção de áreas aridas (Ma et al., 2018). De facto, no presente estudo não é dos VI que mais se encontra relacionado com a biomassa.

Muitos estudos (Padalia et al., 2019) demonstraram que a inclusão de informação de bandas da região espectral RE, melhorou a sensibilidade dos índices na determinação de parâmetros biofísicos caracterizadores da vegetação. Por exemplo Korhonen et al., (2017), que usaram IV com bandas do RE do *Sentinel 2* para estimar o LAI e o grau de cobertura de florestas boreais de coníferas, obtiveram muito bons resultados com IV elaborados com bandas do RE. Tal não foi o caso do presente estudo, que revelou que os IV que usam as bandas RE possuem $R^2 < 0,60$, não sendo, portanto, dos melhores. Estas bandas têm resolução de 20 m, enquanto que a resolução da banda do vermelho e do NIR (banda larga) é de 10 m, o que eventualmente poderá ser uma explicação. O facto de não ter sido efetuada correção atmosférica também poderá ser uma justificação para o menor desempenho deste tipo de IV. Um estudo sobre o *Sentinel 2* (Osgouei et al., 2019) mostra que a diferença nos valores da refletância antes e depois da correção atmosférica é mais importante nas bandas do RE. Hadjimitsis et al. (2010) comprovam que IV sem correção atmosférica têm desempenho inferior a IV corrigidos, no cálculo da evapotranspiração de culturas agrícolas, parâmetro importante para a caracterização do estado da vegetação. Rujoiu-Mare et al (2017) também mostram que a assinatura espectral de florestas de coníferas, com correção atmosférica, realça a resposta na zona do RE.

Ainda uma outra explicação poderá derivar do fato da vegetação, como resultado de anos de seca sucessivos, e de se estar na estação seca, não estar fotossinteticamente ativa e como tal, estes IV não serem muito efetivos.

O TCARI que usa a Banda 7 (RE) foi um dos IV com coeficiente de determinação elevado (0,71). O TCARI que usa a Banda 6, também do RE, teve um desempenho um pouco inferior (0,65). Em oposição, o TCARI que usa a Banda 5, igualmente do RE, teve um R^2 dos mais baixos (0,18). Ou seja, dentro da banda do RE há diferenças importantes no respeitante à correlação com a biomassa. Osgouei et al. (2019) apresentam a assinatura espectral, no *Sentinel 2*, de várias classes de uso do solo, as florestas apresentando valores sucessivamente superiores de refletância nas bandas B5, B6 e B57. Isto significa que a diferença entre a refletância no RE e as bandas do vermelho e do verde vai aumentando, o que poderá explicar o melhor desempenho das Bandas 5 e 7.

O NDII (8a e B11) usa o SWIR, zona espectral não muito afetada pela atmosfera, o que poderá explicar o seu bom desempenho.

5. CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Os resultados obtidos evidenciam que a biomassa de povoamentos florestais de pinheiros pode ser avaliada de uma forma expedita através da utilização de dados de detecção remota, mesmo em caso de grande heterogeneidade não só arbórea como arbustiva. De facto, apesar das parcelas serem diferentes do ponto de vista estrutural e de composição, foram desenvolvidos modelos válidos e com R^2 elevado. O melhor modelo foi o DVI, que usa o vermelho e a banda estreita do NIR. Trata-se de um IV de formulação muito simples. O NDVI, um dos IV mais usados, não se revelou dos melhores modelos para a determinação da biomassa, muito provavelmente devido a problemas de saturação para elevada quantidade de vegetação.

O presente estudo tem várias limitações, sendo uma das mais importantes o facto do número de amostras ser reduzido face à extensão da Herdade. Por outro lado, embora tenham sido gerados pontos de amostragem aleatórios, é notória uma maior concentração dos mesmos na parte central da Herdade. Assim, uma das recomendações para estudos futuros consistirá em alargar a área de amostragem para toda a Herdade.

Verificou-se haver poucas parcelas com Pinheiros-mansos jovens e meia-idade. Desta forma, seria desejável, no futuro, haver a inclusão de parcelas com composição arbórea mais variada.

Uma outra limitação é o fato de não ter sido amostrada a componente arbustiva. Um estudo (Rodrigues, 2002) mostra existir uma grande variação quer na composição quer na biomassa desta componente do ecossistema na Herdade da Apostiça. Além da componente arbustiva também não foi amostrada a componente substrato, que poderá ser importante, em algumas áreas, para o sinal espectral, especialmente no caso de formações de menor grau de cobertura arbórea. Em algumas parcelas observou-se a existência de uma grande quantidade de manta morta (caruma) que tem uma assinatura espectral muito diferente da assinatura das folhas verdes. Os povoamentos têm heterogeneidade espacial e mesmo com uma resolução espacial superior à de sensores tradicionalmente usados, como é o caso do TM dos satélites *Landsat*, o sinal espectral referente a um pixel de 10 m diz respeito ao conjunto de objetos incluídos na sua área, ou seja, copa das árvores, estrato arbustivo (não do herbáceo pois no verão encontra-se senescente) e do substrato, exceto no caso de um Pinheiro-manso de grande porte, cuja copa ocupe, na totalidade, a dimensão de um pixel.

Um outro aspeto importante é o erro associado à localização do centro da parcela. Apesar do GPS usado ter precisão sub-métrica, o erro pode influenciar de forma decisiva os modelos, como é o caso de árvores de grandes dimensões, situadas no limite da parcela.

Poder-se-ão também desenvolver modelos entre os IV e as diferentes componentes da biomassa (folhas, troncos, ramos), pois cada uma delas tem importância diferente a nível do

ecossistema. Por outro lado, também poderão ser estabelecidas regressões entre os IV e a densidade das parcelas, uma vez que a densidade também é um parâmetro estrutural importante das florestas. Ainda, com os dados recolhidos poder-se-á calcular a área basal e o volume da madeira e, da mesma forma, procurar a existência de relações com IV, apesar do presente trabalho pretender debruçar-se, apenas, na componente ecológica dos sistemas florestais. No entanto, se estas relações forem fortes e válidas, poderão dar indicações muito úteis aos proprietários, do ponto de vista económico.

O fato de não ter sido efetuada correção atmosférica da imagem poderá ter afetado o desempenho dos IV, pelo que, em trabalhos futuros será desejável proceder a esta correção.

Finalmente, tendo mais parcelas de Pinheiros-mansos poder-se-ão desenvolver modelos de regressão diferentes para as duas espécies, sendo para tal necessário efetuar primeiro uma classificação das imagens.

Em “jeito de conclusão”:

Atualmente o *Sentinel 2* é o único satélite com imagens gratuitas e que inclui bandas da região RE com resolução espacial razoável (20 m), além de bandas do vermelho e do infravermelho próximo com boa resolução espacial (10 m), informação que possibilita o acompanhamento da biomassa de povoamentos de pinheiros.

Os resultados do presente trabalho mostram que a informação do *Sentinel 2* se encontra relacionada com características estruturais de parcelas de pinhais, nomeadamente a biomassa, fato que pode ser usado por gestores para o *design* de estratégias de desbaste e de limpeza/remoção seletiva de carga de combustível ou outras ações de gestão de povoamentos florestais. Os modelos gerados no presente estudo são limitados a uma área geográfica restrita, no entanto, a metodologia seguida pode ser aplicada noutras regiões. Mais uma vez se chama a atenção de que a área estudada é heterogénea e, mesmo assim, foram obtidos bons resultados. Este fato é extremamente importante pois ecossistemas heterogéneos fornecem uma grande variedade de serviços ecológicos tanto sociais como ecológicos como económicos.

5.1.1 Limitações do estudo

Desta forma, e em jeito de resumo, a Figura 5.1 mostra um pequeno sumário do que foi descrito relativamente às limitações constatadas durante o estudo.

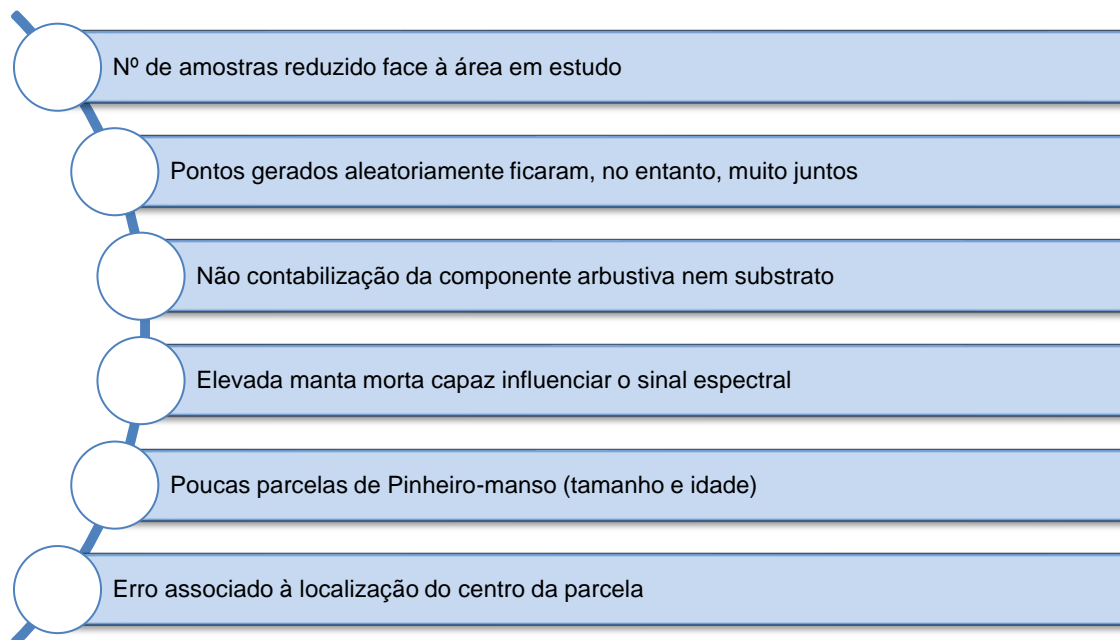


Figura 5.1 - Resumo das limitações observadas no âmbito do estudo

5.1.2 Recomendações e propostas futuras

Relativamente a recomendações e a propostas a seguir futuramente, apresenta-se a Figura 5.2.

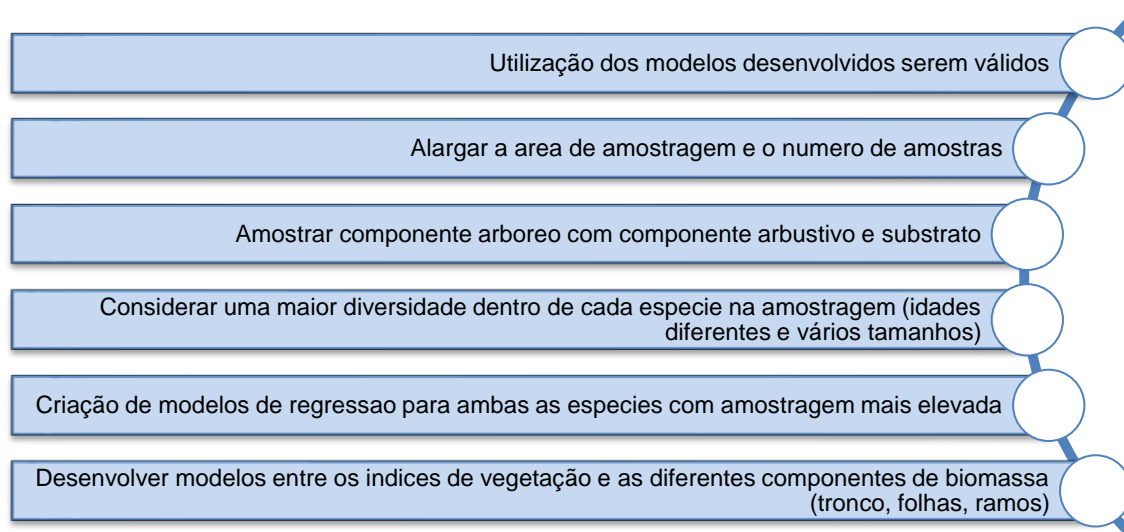


Figura 5.2 - Resumo das recomendações e propostas a desenvolver futuramente

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adan, M. S. (2017). *Intergrating Sentinel-2 derived vegetation indices and terrestrial laser scanner to estimate above- ground biomass/carbon in ayer hitam tropical forest Malaysia*. Thesis submitted to the faculty of geo-information science and earth observation of the University of Twente in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in Geo-information Science and Earth Observation. Specialization: Natural Resources Management.
- Aguiar, C., Capelo, J. & Catry, F. (2007). Distribuição dos pinhais em Portugal. In: Pinhais e eucaliptais: a floresta cultivada. Joaquim Sande Silva (coord). Público, Comunicação Social, SA e Fundação Luso-Americana para o desenvolvimento.
- Alan, J., Castillo, A., Apan, A. A., Maraseni, T. N., & Salmo, S. G. (2017). Estimation and mapping of above-ground biomass of mangrove forests and their replacement land uses in the Philippines using Sentinel imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 134, 70–85. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.10.016>
- Alía, R. & Martín S. (2003). EUFORGEN Technical Guidelines for genetic conservation and use for Maritime pine (*Pinus pinaster*). (6 pp.). Rome, Italy: International Plant Genetic Resources Institute.
- Amorim, A. (2015). *Deteção remota e geoprocessamento automático no estudo da evolução de margens estuarinas (Estuário do Tejo)*. Dissertação apresentada para obtenção de grau de mestre em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento de Território da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Atlas do Ambiente Digital. (2019). Home Page da Agência Portuguesa do Ambiente. <https://sniamb.apambiente.pt/content/catálogo>
- Baret, F. & Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35, 161-173.
- Barrett, E. C. & Curtis, L. F. (1982). Introduction to environmental remote sensing. Chapman and Hall, Ltd., London, 352 pp.
- Bonansea, M., Ledesma, M., Bazán, R., Ferral, A., German, A., O'Mill, P., Rodriguez, C., & Pinotti, L. (2019). Evaluating the feasibility of using Sentinel-2 imagery for water clarity assessment in a reservoir. *Journal of South American Earth Sciences*, 95(July), 102265. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102265>
- Boratto, I. M. D. P., & Gomide, R. L. (2013). Aplicação dos índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF na caracterização da cobertura vegetativa da região Norte de Minas Gerais. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE*.

- Braz, A. M., Águas, T. D. A., & Mirandola Garcia, P. H. (2015). Análise de índices de vegetação NDVI E SAVI e Índice de Área Foliar (IAF) para a comparação da cobertura vegetal na Bacia Hidrográfica do Córrego Ribeirãozinho, Município De Selvíria – Ms. *Revista Percurso*, 7(2), 5. <https://doi.org/10.4025/revpercurso.v7i2.28758>
- Caeiro, R. (2015). *Classificação de dados LANDSAT 8 do Norte de Portugal com recurso a Geographic object-based image Analysis (GEOBIA)*. Dissertação de Mestrado em Gestão do Território, Especialização em Detecção Remota e Sistemas de Informação Geográfica. Faculdade de Ciências Sociais e Humanas da Universidade Nova de Lisboa.
- Cai, Y., Lin, H., & Zhang, M. (2019). Mapping paddy rice by the object-based random forest method using time series Sentinel-1/Sentinel-2 data. *Advances in Space Research*, 64(11), 2233–2244. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.08.042>
- Cardil, A., Mola-yudego, B., & Blázquez-casado, Á. (2019). Fire and burn severity assessment : Calibration of Relative Differenced Normalized Burn Ratio (RdNBR) with field data. *Journal of Environmental Management*, 235(January), 342–349. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.077>
- Chen, Y., Guerschman, J., Cheng, Z., & Guo, L. (2019). Remote sensing for vegetation monitoring in carbon capture storage regions: A review. *Applied Energy*, 240(January), 312–326. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.027>
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. 2ª ed. Madrid: Ediciones Rialp.
- Cleveres, J. (1991). Application of the WDVl in estimating LAI at the generative stage of barley. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 46(1), 37–47. [https://doi.org/10.1016/0924-2716\(91\)90005-G](https://doi.org/10.1016/0924-2716(91)90005-G)
- Colson, D., Petropoulos, G. P., & Ferentinos, K. P. (2018). *Int J Appl Earth Obs Geoinformation Exploring the Potential of Sentinels-1 & 2 of the Copernicus Mission in Support of Rapid and Cost-effective Wild fire Assessment*. 73(March), 262–276. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.011>
- Copernicus. (n.d.). About Copernicus. Retrieved July 10, 2019, from <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus>
- Correia, A. V., Oliveira, A. C. & Fabião, A. (2007). *Biologia e ecologia do Pinheiro-bravo*. In: Pinhais e eucaliptais: a floresta cultivada. Joaquim Sande Silva (coord). Público, Comunicação Social, SA e Fundação Luso-Americana para o desenvolvimento.
- Costa, J. C. (2007). *Biologia e ecologia do Pinheiro-manso*. In: Pinhais e eucaliptais: a floresta cultivada. Joaquim Sande Silva (coord). Público, Comunicação Social, SA e Fundação Luso-Americana para o desenvolvimento.
- Cristy, A., Ozaki, Y., & Gregoriou, V. (2001). Electromagnetic radiation and the electromagnetic spectrum. In *Comprehensive Analytical Chemistry* (Vol. 35, pp. 1–9).

- Demarchi, J. C., Pirolí, E. L., & Zimback, C. R. L. (2011). *Temporal analysis of the land use and comparison between NDVI and SAVI indexes in the city of Santa Cruz do Rio Pardo - SP using Landsat-5 images*. Curitiba, Departamento de Geografia – UFPR. 21, 234–271.
- Demattê, J. A. M., Dotto, A. C., Paiva, A. F. S., Sato, M. V., Dalmolin, R. S. D., de Araújo, M. do S. B., da Silva, E. B., Nanni, M. R., ten Caten, A., Noronha, N. C., Lacerda, M. P. C., de Araújo Filho, J. C., Rizzo, R., Bellinaso, H., Francelino, M. R., Schaefer, C. E. G. R., Vicente, L. E., dos Santos, U. J., de Sá Barretto Sampaio, E. V., Menezes, R. S. C., de Souza, J. J. L. L., Abrahão, W. A. P., Coelho, R. M., Grego, C. R., Lani, J. L., Fernandes, A. R., Gonçalves, D. A. M., Silva, S. H. G., de Menezes, M. D., Curi, N., Couto, E. G., dos Anjos, L. H. C., Ceddia, M. B., Pinheiro, É. F. M., Grunwald, S., Vasques, G. M., Marques Júnior, J., da Silva, A. J., Barreto, M. C. d. V., Nóbrega, G. N., da Silva, M. Z., de Souza, S. F., Valladares, G. S., Viana, J. H. M., da Silva Terra, F., Horák-Terra, I., Fiorio, P. R., da Silva, R. C., Frade Júnior, E. F., Lima, R. H. C., Alba, J. M. F., de Souza Junior, V. S., Brefin, M. D. L. M. S., Ruivo, M. D. L. P., Ferreira, T. O., Brait, M. A., Caetano, N. R., Brighenti, I., de Sousa Mendes, W., Safanelli, J. L., Guimarães, C. C. B., Poppiel, R. R., e Souza, A. B., Quesada, C. A., & do Couto, H. T. Z. (2019). The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): A general view, application and challenges. *Geoderma*, 354(August), 113793. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.043>
- Dias, A. C., & Arroja, L. (2012). Environmental impacts of eucalypt and maritime pine wood production in Portugal. *Journal of Cleaner Production*, 37, 368–376. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.056>
- Direção Geral do Território. (2017a). Breve descrição dos satélites Sentinel. Retrieved July 15, 2019, from http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/detecao_remota/copernicus/componente_espaco/breve_descricao_dos_satelites_sentinel/
- Direção Geral do Território. (2017b). Copernicus. Retrieved July 10, 2019, from <http://www.dgterritorio.pt/copernicus/>
- Emery, W., & Camps, A. (2017a). Basic electromagnetic concepts and applications to optical sensors. In *Introduction to Satellite Remote Sensing* (pp. 43–83).
- Emery, W., & Camps, A. (2017b). The history of satellite remote sensing. In *Introduction to Satellite Remote Sensing: Atmosphere, Ocean, Land and Cryosphere Applications* (pp. 1–42).
- Emery, W., & Camps, A. (2017c). Optical imaging systems. In *Theory of Remote Image Formation* (pp. 111–152). <https://doi.org/10.1017/cbo9780511543418.005>
- ESA. (n.d.). Missions - Sentinel Online. Retrieved June 13, 2019, from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions>
- ESA. (2015). *Sentinel-2 User Handbook*. (1), 1–64.

- ESA. (2015a). Sentinel-6. Retrieved July 16, 2019, from https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-6
- ESA. (2015b). TM Sensor Description. Retrieved July 1, 2019, from <https://earth.esa.int/web/sppa/mission-performance/esa-3rd-party-missions/landsat-1-7/tm-etm/sensor-description>
- ESA. (2019). Spatial - Resolutions - Sentinel-2 MSI. Retrieved August 12, 2019, from <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>
- Europeia, C. (2018). *DECISÃO DE EXECUÇÃO (UE) 2018/621 DA COMISSÃO de 20 de abril de 2018 relativa às especificações técnicas para a componente espacial do Copernicus, em conformidade com o Regulamento (UE) n.o 377/2014 do Parlamento Europeu e do Conselho.*
- Fady B., Fineschi S., Vengramin, G. G. (2004). EUFORGEN Technical guidelines for genetic conservation and use of Italian stone pine (*Pinus pinea*). International Plant Genetic Resources Institute, FAO, Rome, Italy, pp. 6.
- Faias, S. (2009). *Analysis of Biomass Expansion Factors for the most important tree species in Portugal.*
- Figueiral, I. (1995). Charcoal analysis and the history of *Pinus pinaster* (cluster pine) in Portugal. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 89(3–4), 441–454. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(95\)00013-3](https://doi.org/10.1016/0034-6667(95)00013-3)
- Forkuor, G., Benewinde Zoungrana, J. B., Dimobe, K., Ouattara, B., Vadrevu, K. P., & Tondoh, J. E. (2020). Above-ground biomass mapping in West African dryland forest using Sentinel-1 and 2 datasets - A case study. *Remote Sensing of Environment*, 236(November 2018), 111496. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111496>
- Gitelson, A. A. (2004). *Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation.* 173.
- Ghosh, S. M., & Behera, M. D. (2018). Aboveground biomass estimation using multi-sensor data synergy and machine learning algorithms in a dense tropical forest. *Applied Geography*, 96(May), 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.05.011>
- Gomes, D. (2018). *Exploração da utilização de dados de observação da Terra para deteção de utilizações ilegais de água no setor agrícola – experiências em Portugal e Espanha.* Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia do Ambiente da Universidade Nova de Lisboa Faculdade de Ciências e Tecnologias.
- Gómez, M. G. C. (2017). *Joint use of Sentinel-1 and Sentinel-2 for land cover classification : A machine learning approach.* (18).

- Gonçalves, A. C., & Pommerening, A. (2012). Spatial dynamics of cone production in Mediterranean climates: A case study of *Pinus pinea* L. in Portugal. *Forest Ecology and Management*, 266, 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.11.007>
- Gonçalves, A. C., Sousa, A. M. O., & Mesquita, P. G. (2017). Estimation and dynamics of above ground biomass with very high resolution satellite images in *Pinus pinaster* stands. *Biomass and Bioenergy*, 106, 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.08.026>
- Gonsamo, A., & Chen, J. M. (2014). Continuous observation of leaf area index at Fluxnet-Canada sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189–190, 168–174. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.01.016>
- Groot, R. De, Brander, L., Ploeg, S. Van Der, Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., Christie, M., Crossman, N., Ghermandi, A., Hein, L., Hussain, S., Kumar, P., Mcvittie, A., Portela, R., Rodriguez, L. C., & Beukering, P. Van. (2012). Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, 1(1), 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.005>
- Guo, P. T., Li, M. F., Luo, W., & Cha, Z. Z. (2019). Estimation of foliar nitrogen of rubber trees using hyperspectral reflectance with feature bands. *Infrared Physics and Technology*, 102(August), 103021. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103021>
- Haboudane, D., Miller, J. R., Pattey, E., Zarco-tejada, P. J., & Strachan, I. B. (2004). *Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture*. 90, 337–352. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.013>
- Hadjimitsis, D. G., Papadavid, G., Agapiou, A., Themistocleous, K., Hadjimitsis, M. G., Retalis, A., Michaelides, S., Chrysoulakis, N., Toullos, L., & I. Clayton, C. R. (2010). Atmospheric correction for satellite remotely sensed data intended for agricultural applications: Impact on vegetation indices. *Natural Hazards and Earth System Science*, 10(1), 89–95. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-89-2010>
- Halme, E., Pellikka, P., & Möttöus, M. (2019). Utility of hyperspectral compared to multispectral remote sensing data in estimating forest biomass and structure variables in Finnish boreal forest. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, (April). <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101942>
- Hammer, Ø., Harper, D., Ryan, P. (2001). PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontol. Electron.* 4, 1–9.
- Hoffer, R. M. (1978). Biological and physical considerations in applying computeraided analysis techniques to remote sensor data. In: *Remote sensing: the quantitative approach*, (P. H. Swain e S. M. Davis, Eds.), Mc Graw-Hill Book Company, pp. 227-289.

- Hoffer, R. M. & Johannsen, C. J. (1969). Ecological potentials in spectral signature analysis. In: Remote sensing in ecology. Autor: Philip L Johnson; Ecological Society of America.; American Society of Limnology and Oceanography. Editora: Athens: University of Georgia Press.
- Houborg, R., Fisher, J. B., & Skidmore, A. K. (2015). Advances in remote sensing of vegetation function and traits. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 43, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.06.001>
- Hu, B., Xu, Y., Wan, B., Wu, X., & Yi, G. (2018). Hydrothermally altered mineral mapping using synthetic application of Sentinel-2A MSI, ASTER and Hyperion data in the Duolong area, Tibetan Plateau, China. *Ore Geology Reviews*, 101(July 2018), 384–397. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.07.017>
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25: 295-309.
- Hunt, E. R., Li, L., Yilmaz, M. T., & Jackson, T. J. (2011). Comparison of vegetation water contents derived from shortwave-infrared and passive-microwave sensors over central Iowa. *Remote Sensing of Environment*, 115(9), 2376–2383. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.04.037>
- ICNF, (2009). Instruções para o Trabalho de Campo do Inventário Florestal Nacional. Lisboa. Portugal. pp 67.
- ICNF, (2010). 5º Inventário Florestal Nacional 2005-2006. Relatório Final. Autoridade Florestal Nacional, Lisboa.
- ICNF, (2015). 6º Inventário Florestal Nacional 2015. Relatório Final. Autoridade Florestal Nacional, Lisboa
- ICNF, (2013). Áreas dos usos do solo e das espécies florestais de Portugal continental. Resultados preliminares. Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas. Lisboa. 34 pp.
- Ienco, D., Interdonato, R., Gaetano, R., Ho, D., & Minh, T. (2019). ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Combining Sentinel-1 and Sentinel-2 Satellite Image Time Series for land cover mapping via a multi-source deep learning architecture. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 158(September), 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.09.016>
- Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica. (1991). O clima de Portugal. Fascículo XLIX, Volume 2 – 2ª Região. Normais climatológicas da Região de "Setúbal", correspondentes a 1971-1980. Lisboa.
- Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). (n.d.). Previsão 10 dias, horaária diária, localidade. Retrieved October 23, 2019, from <https://www.ipma.pt/pt/otempo/prev.localidade.hora/>

- Jin, X., Li, Z., Feng, H., Ren, Z., & Li, S. (2019). Deep neural network algorithm for estimating maize biomass based on simulated Sentinel 2A vegetation indices and leaf area index. *The Crop Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2019.06.005>
- Jin, X., Li, Z., Feng, H., Ren, Z., & Li, S. (2020). Estimation of maize yield by assimilating biomass and canopy cover derived from hyperspectral data into the AquaCrop model. *Agricultural Water Management*, 227(October 2019), 105846. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105846>
- Jin, X., Song, X., & Li, Z. (2013). *Estimation of Leaf Water Content in Winter Wheat Using Grey Relational Analysis–Partial Least Squares Modeling with Hyperspectral Data*. (June 2014). <https://doi.org/10.2134/agronj2013.0088>
- Kanjir, U., Greidanus, H., & Oštir, K. (2018). Vessel detection and classification from spaceborne optical images: A literature survey. *Remote Sensing of Environment*, 207(November 2016), 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.12.033>
- Klemas, V. (2009). Sensors and techniques for observing coastal ecosystems. In *Remote Sensing and Geospatial Technologies for Coastal Ecosystem Assessment and Management* (pp. 17–44). <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88183-4>
- Korhonen, L., Hadi, Packalen, P., & Rautiainen, M. (2017). Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 in the estimation of boreal forest canopy cover and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 195, 259–274. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.021>
- Kumar, V., Sharma, A., Bhardwaj, R., & Kumar, A. (2018). Remote Sensing Applications : Society and Environment Comparison of different reflectance indices for vegetation analysis using Landsat-TM data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 12(October), 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.10.013>
- Liang, S., Li, X., & Wang, J. (2012). A Systematic view of remote sensing. In *Advanced Remote Sensing* (1st ed., pp. 1–31). Academic Press.
- Lira, V. M., Silva, B. B., Neto, J. D., Azevedo, C. A. V., & Franco, E. S. (2011). Variação sazonal da cobertura vegetal em áreas do submédio São Francisco a partir de dados NDVI e imagens TM-LANDSAT 5. *Enciclopédia Biosfera*, 7(12), 1–9. Retrieved from [http://www.conhecer.org.br/enciclop/2011a/agrarias/Variacao sazonal.pdf](http://www.conhecer.org.br/enciclop/2011a/agrarias/Variacao%20sazonal.pdf)
- Liu, Y., Gong, W., Xing, Y., Hu, X., & Gong, J. (2019). ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Estimation of the forest stand mean height and aboveground biomass in Northeast China using SAR Sentinel-1B , multispectral Sentinel-2A , and DEM imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 151(November 2018), 277–289. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.03.016>

- Liu, G. R., Liang, C. K., Kuo, T. H., Lin, T. H., & Huang, S. J. (2004). Comparison of the NDVI, ARVI and AFRI vegetation index, along with their relations with the AOD using SPOT 4 vegetation data. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 15(1), 15–31.
- Ma, Q., Su, Y., Luo, L., Li, L., Kelly, M., & Guo, Q. (2018). Evaluating the uncertainty of Landsat-derived vegetation indices in quantifying forest fuel treatments using bi-temporal LiDAR data. *Ecological Indicators*, 95(May), 298–310. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.07.050>
- Maroco, J. (2007). *Análise estatística com utilização do SPSS*, 3ª Edição. Edições Sílabo, Lda.
- Mendes, A. C. (2007). A importância económico-social do Pinheiro-bravo. In: Pinhais e eucaliptais: a floresta cultivada. Joaquim Sande Silva (coord). Público, Comunicação Social, SA e Fundação Luso-Americana para o desenvolvimento.
- Mensah, A., Sarfo, D., & Partey, S. (2018). Assessment of vegetation dynamics using remote sensing and GIS: A case of Bosomtwe Range Forest Reserve, Ghana. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.04.004>
- Naji, T. A. H. (2018). Study of vegetation cover distribution using DVI, PVI, WdVI indices with 2D-space plot. *Journal of Physics: Conference Series*, 1003(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1003/1/012083>
- NASA. (n.d.). ASTER Global Digital Elevation Map. Retrieved December 12, 2019, from <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>
- NASA. (2019a). A Landsat Timeline. Retrieved July 1, 2019, from <https://landsat.gsfc.nasa.gov/a-landsat-timeline/>
- NASA. (2019b). The Multispectral Scanner System « Landsat Science. Retrieved July 1, 2019, from <https://landsat.gsfc.nasa.gov/the-multispectral-scanner-system/>
- Osgouei, P. E., Kaya, S., & Sertel, E. (2019). *Separating Built-Up Areas from Bare Land in Mediterranean Cities Using Sentinel-2A Imagery*. 1–24. <https://doi.org/10.3390/rs11030345>
- Padalia, H., Sinha, S. K., Bhawe, V., Trivedi, N. K., & Kumar, A. S. (2019). Estimating canopy LAI and chlorophyll of tropical forest plantation North India using Sentinel-2 data. *Advances in Space Research*. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.09.023>
- Peixoto, J. P. (1961). Noções fundamentais sobre os fenómenos da radiação solar. *Electricidade*, 20: 337-342.
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution*, 20(9), 503–510. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
- Pinty, B., & M. Verstraete. (1992). GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio* 101: 15-20.

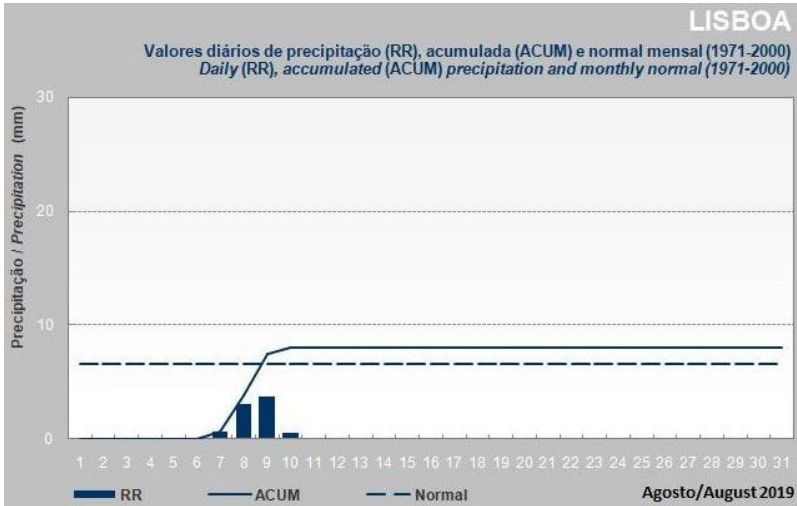
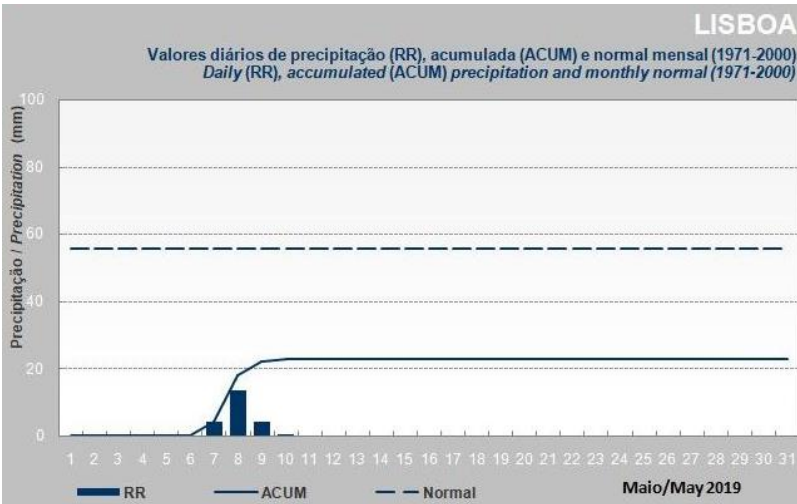
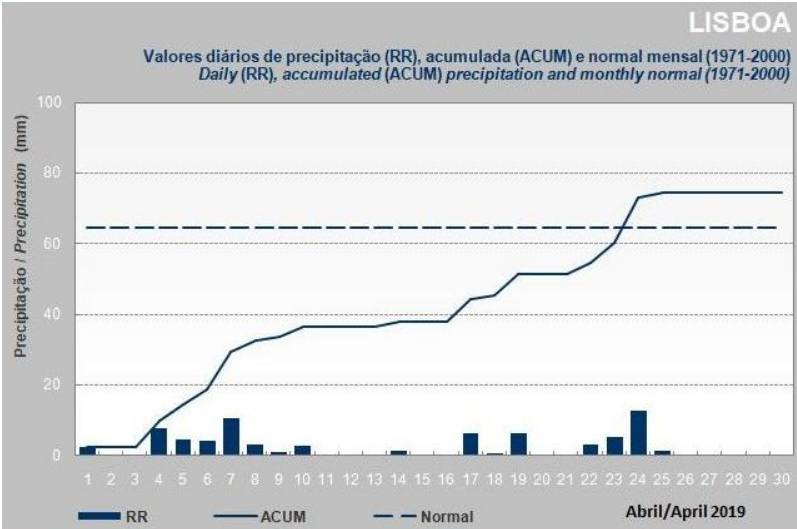
- Prieto-Recio, C., Martín-García, J., Bravo, F., & Diez, J. J. (2015). Unravelling the associations between climate, soil properties and forest management in *Pinus pinaster* decline in the Iberian Peninsula. *Forest Ecology and Management*, 356, 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.07.033>
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H., Sorooshian, S. A. (1994). A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*, 48: 119–126.
- Reichstein, M., & Carvalhais, N. (2019). Aspects of Forest Biomass in the Earth System: Its Role and Major Unknowns. *Surveys in Geophysics*, 40(4), 693–707. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09551-x>
- Ren, H., Zhou, G., & Zhang, F. (2018). Remote sensing of environment using negative soil adjustment factor in soil-adjusted vegetation index (SAVI) for aboveground living biomass estimation in arid grasslands. *Remote Sensing of Environment*, 209(79), 439–445. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.068>
- Richardson, A. J. & Wiegand, C. L. (1977). Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43: 1541-1552.
- Rodrigues, E. B. P. M. (2002). Interacções Produtividade/Fitófagos Para o Ecossistema Pinhal. Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Doutor em Ciências do Ambiente na especialidade de Sistemas Naturais, pela Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa
- Rokni, K., & Musa, T. A. (2019). Normalized Difference Vegetation Change Index: A technique for detecting vegetation changes using Landsat imagery. *Catena*, 178(September 2018), 59–63. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.03.007>
- Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55(2), 95–107. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7)
- Rosário, L., Cruz, C. S. & Bento, P. (2006). Ecologia do Sítio Fernão Ferro/Lagoa de Albufeira no Concelho do Seixal. Situação de referência sobre vegetação e habitats naturais – o caso particular do Rego Travesso. Lisboa.
- Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium, 1, 309–317. <https://doi.org/citeulike-article-id:12009708>
- Rubel, F., & Kotteck, M. (2010). Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorol. Z.*, 19, 135-141. doi: 10.1127/0941-2948/2010/0430, acedido em: <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/> (20/07/2019).

- Rujoiu-Mare, M. R., Olariu, B., Mihai, B. A., Nistor, C., & Săvulescu, I. (2017). Land cover classification in Romanian Carpathians and Subcarpathians using multi-date Sentinel-2 remote sensing imagery. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1), 496–508. <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1365570>
- Santos Pereira, J. (2014.) O futuro da floresta em Portugal. Fundação Francisco Manuel dos Santos e João Santos Pereira (eds).
- Shahrokhnia, M. H., & Ahmadi, S. H. (2019). Remotely sensed spatial and temporal variations of vegetation indices subjected to rainfall smount and distribution properties. In *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815226-3.00002-8>
- Silva, C. A. V., Silva, H. A., Oliveira, T. H., & Galvíncio, J. D. (2009). Uso do sensoriamento remoto através de Índices de Vegetação NDVI, SAVI e IAF na microrregião de Itamaracá - PE. *Anais Do 1º Simpósio de Cadeias Produtivas e Desenvolvimento Sustentável Na Amazônia*, 3079–3085.
- Silva, J. S. (2007). O pinhal manso e outros pinheiros. In: Pinhais e eucaliptais: a floresta cultivada. Joaquim Sande Silva (coord). Público, Comunicação Social, SA e Fundação Luso-Americana para o desenvolvimento.
- Smith, V., Portillo-Quintero, C., Sanchez-Azofeifa, A., & Hernandez-Stefanoni, J. L. (2018). Assessing the accuracy of detected breaks in Landsat time series as predictors of small scale deforestation in tropical dry forests of Mexico and Costa Rica. *Remote Sensing of Environment*, 221(December 2018), 707–721. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.020>
- Sociedade Portuguesa de Botânica. (n.d.). Flora-on. Retrieved September 16, 2019, from <https://flora-on.pt/>
- Sridharan, K. (2016). The electromagnetic spectrum. In *Spectral Methods in Transition Metal Complexes* (pp. 1–12). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809591-1.00001-3>
- Symonds, M. R. E., & Moussalli, A. (2011). *A brief guide to model selection, multimodel inference and model averaging in behavioural ecology using Akaike ' s information criterion*. 13–21. <https://doi.org/10.1007/s00265-010-1037-6>
- Tehrany, M., Kumar, L., & Drielsma, M. (2017). Review of native vegetation condition assessment concepts, methods and future trends debris. *Journal for Nature Conservation*, 40(August), 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2017.08.004>
- Tomé, M., Barreiro, S., Paulo, J., & Faias, S. (2007). Selecção de equações para estimação de variáveis da árvore em inventários florestais a realizar em Portugal. Instituto Superior de Agronomia, Universidade técnica de Lisboa. Publicações FORCHANGE PT 9/2007
- Xiao, C., Li, P., & Feng, Z. (2019). Int J Appl Earth Obs Geoinformation Monitoring annual dynamics of mature rubber plantations in Xishuangbanna during 1987-2018 using Landsat

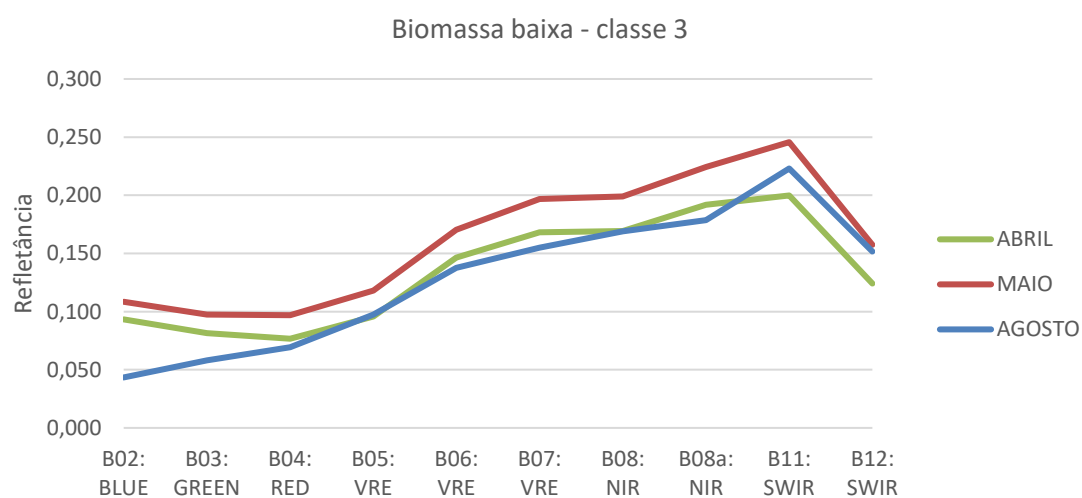
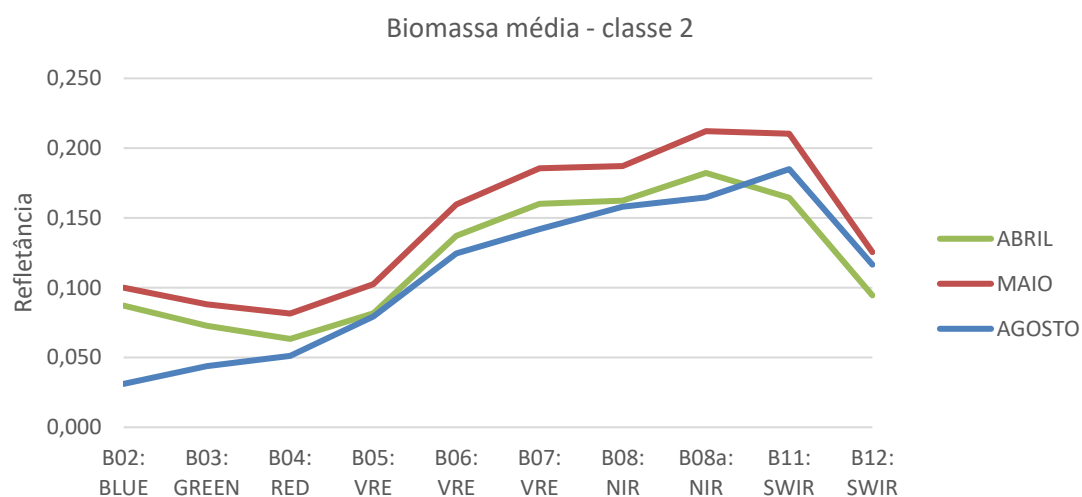
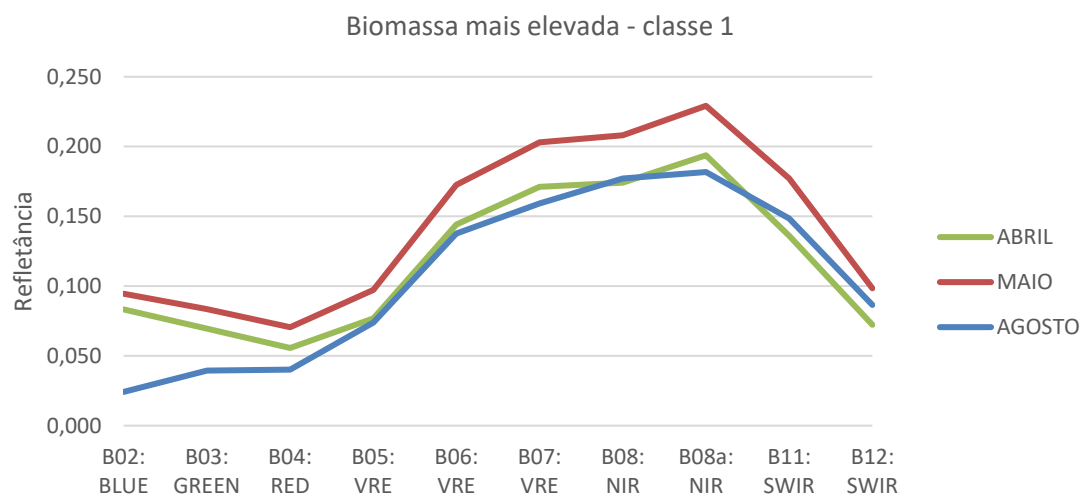
- time series data : A multiple normalization approach. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 77(November 2018), 30–41. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.12.006>
- Walker, K. L. (2016). Seasonal mixing in forest-cover maps for humid tropics and impact of fluctuations in spectral properties of low vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 179, 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.014>
- Wilson, N. R., & Norman, L. M. (2018). Analysis of vegetation recovery surrounding a restored wetland using the normalized difference infrared index (NDII) and normalized difference vegetation index (NDVI). *International Journal of Remote Sensing*, 39(10), 3243–3274. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1437297>
- Witke, S., Yu, X., Karjalainen, M., Hyyppä, J., & Puttonen, E. (2019). Int J Appl Earth Obs Geoinformation Comparison of two-dimensional multitemporal Sentinel-2 data with three-dimensional remote sensing data sources for forest inventory parameter estimation over a boreal forest. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 76(November 2018), 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.11.009>
- Wu, Z., Lei, S., Bian, Z., Huang, J., & Zhang, Y. (2019). Study of the desertification index based on the albedo-MSAVI feature space for semi-arid steppe region. *Environmental Earth Sciences*, 78(6). <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8111-9>
- Zarco-Tejada, P. J., Hornero, A., Beck, P. S. A., Kattenborn, T., Kempeneers, P., & Hernández-clemente, R. (2019). Remote sensing of environment Chlorophyll content estimation in an open-canopy conifer forest with Sentinel-2A and hyperspectral imagery in the context of forest decline. *Remote Sensing of Environment*, 223(February), 320–335. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.031>
- Zhang, M., Su, W., Fu, Y., Zhu, D., Xue, J., & Huang, J. (2019). Super-resolution enhancement of Sentinel-2 image for retrieving LAI and chlorophyll content of summer corn. *European Journal of Agronomy*, 111(17), 125938. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125938>

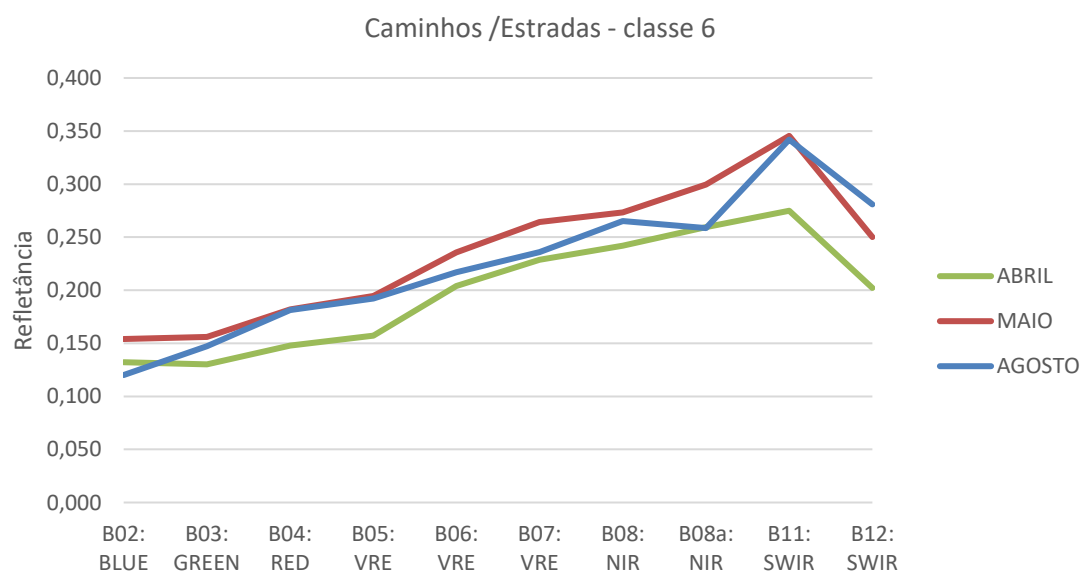
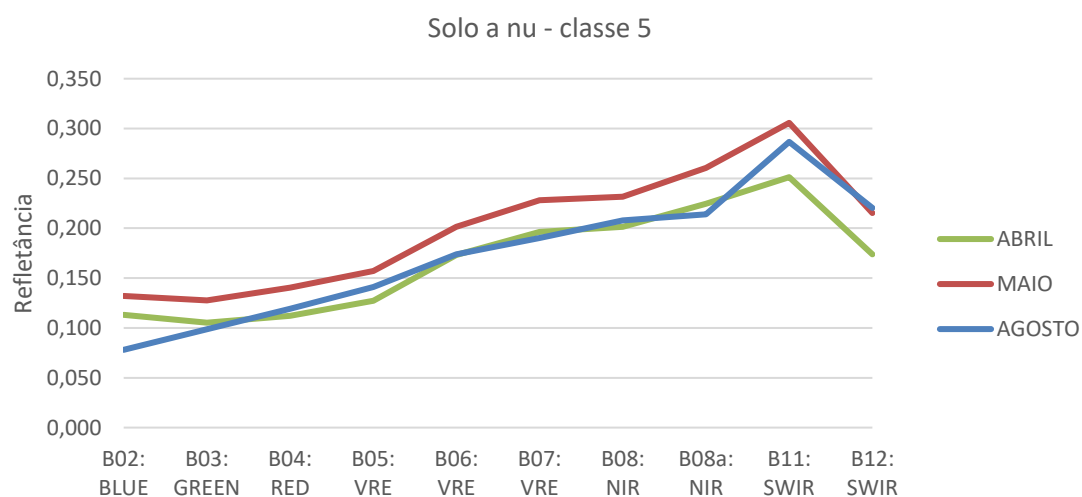
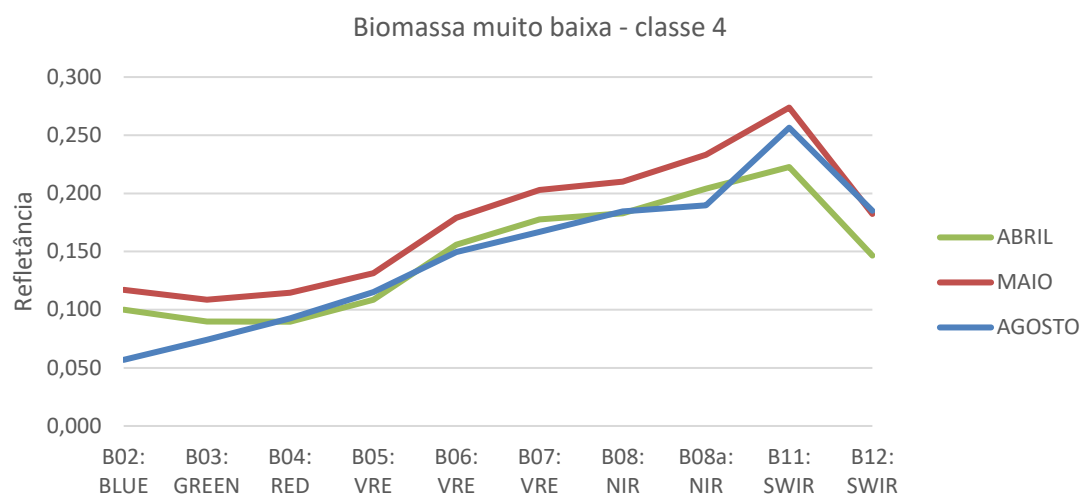
ANEXOS

ANEXO A - Gráficos do IPMA com a precipitação



ANEXO B - Refletâncias por classe





ANEXO C - Dados dendrométricos obtidos no campo

<i>Parcela</i>	<i>Nº da árvore</i>	<i>Espécies de árvore</i>	<i>Altura total (m)</i>	<i>Diâmetros Altura de Peito (cm)</i>	<i>Perímetro Altura de Peito (m)</i>
1	1	PB	17,6	36,8	
				33,9	
	2	PB	4,4	5,9	
				6	
	3	PB	11,9	21,6	
				22,1	
	4	PB	5,8	8,5	
				8,4	
	5	PM	9,2	27,2	0,87
				27,9	
	6	PB	18,9	37,3	
				37	
	7	PB	9,4	29,2	
				22,6	
	8	PB	14,5	23,4	
				22,5	
	9	PB	14,4	28,4	
				28	
	10	PB	13,7	20,1	
				21,4	
	11	PB	17,8	32,3	
				31,6	
2	1	PB	11	18,8	
				20,1	
	2	PB	13,2	19,5	
				19,4	
	3	PB	10,1	13,7	
				13,9	
	4	PB	12,1	20,4	
				19,8	
	5	PB	7,5	13,6	
				13	
	6	PB	5,4	5,3	
				5,2	
	7	PB	13,6	24	
				24,2	
	8	PB	12,7	23,7	
				22,9	
	9	PB	13,8	24	
				24,4	
	10	PB	12,8	18,1	

<i>Parcela</i>	<i>Nº da árvore</i>	<i>Espécies de árvore</i>	<i>Altura total (m)</i>	<i>Diâmetros Altura de Peito (cm)</i>	<i>Perímetro Altura de Peito (m)</i>
				19	
	11	PB	12,6	14	
				13,6	
	12	PB	13,3	28,2	
				26	
	13	PB	11,2	13,6	
				14,8	
	14	PB	13,9	24	
				22,8	
	15	PB	5,4	7,4	
				7	
	16	PB	9	15,9	
				16,6	
	17	PB	14,2	36,1	
				36,4	
	18	PB	4,7	6,6	
				7	
	19	PB	6,4	7,1	
				7	
	20	PM	2,7	14,4	0,457
				14,7	
	21	PB	13,6	27,2	
				27,7	
	22	PB	12,6	16,7	
				17	
	23	PB	5,2	5,1	
				5,3	
	24	PB	13,8	21	
				20	
	25	PB	14,6	30,2	
				31	
	26	PB	15	15,7	
				15,7	
	27	PB	10,1	12,7	
				12,5	
3	1	PB	12,7	27,4	
				27	
	2	PB	4,4	5,9	
				6	
	3	PB	8,5	16,7	
				16,4	
	4	PB	12	31,9	
				32,2	

<i>Parcela</i>	<i>Nº da árvore</i>	<i>Espécies de árvore</i>	<i>Altura total (m)</i>	<i>Diâmetros Altura de Peito (cm)</i>	<i>Perímetro Altura de Peito (m)</i>
	5	PB	8,4	13	
				13	
	6	PB	2,4	2,5	
				2,6	
	7	PM	6,2	17,8	0,57
				18,5	
	8	PB	3,8	5,5	
				5,5	
	9	PB	12,3	22	
				23,2	
	10	sobreiro	2,3	4	0,126
				4	
4	11	sobreiro	2,3	2,4	0,072
				2,2	
	12	PB	12,3	21,6	
				20,7	
	1	PB	11,9	16,5	
				17	
	2	PB	9,7	19,2	
				18,4	
	3	PB	12,6	22,5	
				22,6	
	4	PB	7,8	10,4	
				9,8	
	5	PB	9	12,4	
				12	
	6	PB	6,9	7	
				6,9	
	7	PB	9,7	12,2	
				12,2	
	8	PB	6,6	6,3	
				6,4	
	9	PB	15,4	26,7	
				26,6	
	10	PB	11,3	13	
				12,2	
	11	PB	18,5	34,3	
				33,5	
	12	PB	9,7	9,4	
				9,7	
	13	PB	11,5	18	
				18,4	
	14	PB	10,9	18	

<i>Parcela</i>	<i>Nº da árvore</i>	<i>Espécies de árvore</i>	<i>Altura total (m)</i>	<i>Diâmetros Altura de Peito (cm)</i>	<i>Perímetro Altura de Peito (m)</i>
5				18,5	
	15	PB	3,7	3,4	
				3,5	
	16	PB	6,3	7	
				6	
	17	PB	13,8	24,5	
				25,4	
	18	PB	8	10,7	
				11	
	19	PB	6,8	6,5	
				6,5	
	20	PB	8,2	7,6	
				7,4	
	21	PB	7,4	6,8	
				6,8	
	22	PB	6,7	8,4	
				8,2	
	23	PB	3,8	3,4	
				3,8	
	24	PB	14,8	25,9	
				27,5	
	25	PB	6	8,2	
				8,4	
	26	PB	3	4	
				3,7	
	27	PB	4,8	6,3	
				6,4	
	28	PB	7,3	9,1	
				9,2	
	29	PM	4,5	9,1	0,29
				9,4	
	30	PB	15,6	36,5	
				34,5	
	31	PB	5	3,8	
				3,9	
	32	PB	10,8	17	
				16,9	
5	1	PM	18		2,28
	2	PM	18,7		2,55
5	3	PM	18,4		1,95

<i>Parcela</i>	<i>Nº da árvore</i>	<i>Espécies de árvore</i>	<i>Altura total (m)</i>	<i>Diâmetros Altura de Peito (cm)</i>	<i>Perímetro Altura de Peito (m)</i>
	4	PM	17,6		1,85
	5	PM	17,8		1,93
	6	PM	16,5		2,04
	7	PM	18,2		2,10
6	1	PB	10,3	21,5	
				20,4	
	2	PB	21,6	38,6	
				39,9	
	3	PB	10,2	21,5	
				20,5	
	4	PB	11,7	16	
				15,6	
	5	PB	11,2	21,9	
				21,4	
	6	PB	17,1	26,2	
				26,4	
	7	PB	11,4	20,7	
				20,4	
	8	PB	12,6	20,4	
				19,7	
	9	PB	21,7	33	
				34	
	10	PB	12	23,8	
				24	
	11	PB	11,9	20,7	
				21,4	
	12	PB	19	32,7	
				32,7	
	13	PB	17,7	30,8	
				32,2	
	14	PB	20	36,8	
				39	
	15	PB	14,4	33,3	
				34	
7	1	PB	17,5	27	
				26,2	
	2	PB	16,9	33	
				34,4	
	3	PB	17,1	29	

<i>Parcela</i>	<i>Nº da árvore</i>	<i>Espécies de árvore</i>	<i>Altura total (m)</i>	<i>Diâmetros Altura de Peito (cm)</i>	<i>Perímetro Altura de Peito (m)</i>
				29	
	4	PB	17,5	23,7	
				22,2	
				10,9	
	5	PB	9,9	12	
				20,6	
	6	PB	13,6	20,8	
				21,5	
	7	PB	12,5	22,3	
				27	
	8	PB	16,6	25,7	
				17	
	9	PB	9,9	18	
8	1	PM	4,2	14	0,44
				14	
	2	PB	8,8	12,7	
				13,5	
	3	PB	15,2	23,7	
				23,8	
	4	PB	8,5	14,5	
				15	
	5	PB	16,2	26,4	
				24,9	
	6	PB	7,2	10,5	
				10	
	7	PB	11,3	19	
				20,2	
	8	PB	11,3	13,8	
				13,2	
	9	PB morta	14,8	24,8	
				24	
	10	PB	4,7	7,9	
				8	
	11	PB	7,5	14,9	
				15	
	12	PB	7,2	12	
				12	
	13	PB	6,2	10,3	
				10,4	
	14	PB	5	6,5	
				6,3	
	15	PB	5,5	11	
				10,7	

<i>Parcela</i>	<i>Nº da árvore</i>	<i>Espécies de árvore</i>	<i>Altura total (m)</i>	<i>Diâmetros Altura de Peito (cm)</i>	<i>Perímetro Altura de Peito (m)</i>
9	1	PB	16,2	33,9	
				34,6	
	2	PB	4,6	7	
				6,6	
	3	PB	14	29	
				27	
	4	PB	18	32,4	
				32	
	5	PB	15,3	36	
				33,3	
	6	PB	9,7	16,7	
				17	
	7	PB	17,4	35,2	
				32,2	
	8	PB	15,1	29,6	
				30,3	
	9	PB	16,2	33,7	
				32,5	
	10	PB	16,3	12,5	
				12,7	
	11	PB	12,2	18,7	
				19	
	12	PB	12,5	21,5	
				21	
10	1	PB	13,4	22	
				21,5	
	2	PB	12,6	18,5	
				19,1	
	3	PB	10,7	21,5	
				21,5	
	4	PB	11,4	25,4	
				23,5	
	5	PB	5,9	8,5	
				9,3	
	6	PB	13,6	26,5	
				25,2	
11	1	PB	16,7	33,3	
				32,2	
	2	PB	17,2	27,5	
				27	
	3	PB	18,1	35	
				34,5	
	4	PB	17,8	30	

<i>Parcela</i>	<i>Nº da árvore</i>	<i>Espécies de árvore</i>	<i>Altura total (m)</i>	<i>Diâmetros Altura de Peito (cm)</i>	<i>Perímetro Altura de Peito (m)</i>
				28	
	5	PB	18,2	28,8	
				29,4	
	6	PB	17,4	21	
				20,4	
	7	PB	17,9	22,8	
				22,7	
	8	PB	17,5	36,7	
				38	
	9	PB	17,2	23	
				25,8	
	10	PB	15,5	17,4	
				16,4	
	11	PB	17,3	26,5	
				28	
	12	PB	16,3	21,5	
				21,4	
	13	PB	19	26,5	
				27	
	14	PB	5,4	6,5	
				7	
	15	PB	18,3	34,4	
				33	
	16	PB	17,4	41,4	
				43	
12	1	PB	10,2	12,2	
				11,9	
	2	PB	13,3	20,2	
				19	
	3	PB	19,1	30	
				30,2	
	4	PB	13,4	28,7	
				29,7	
	5	PB	12	20,2	
				19,2	
	6	PB	14	17,5	
				18,3	
	7	PB	12,2	21	
				20,4	
13	1	PB	10,6	18	
				18,1	
	2	PB	13,3	27	
				25,8	

<i>Parcela</i>	<i>Nº da árvore</i>	<i>Espécies de árvore</i>	<i>Altura total (m)</i>	<i>Diâmetros Altura de Peito (cm)</i>	<i>Perímetro Altura de Peito (m)</i>
	3	PB	10,7	22	
				21	
	4	PB	4,2	6,9	
				6,4	
	5	PB	7,3	16,5	
				17,3	
	6	PB	8,5	13	
				13,5	
	7	PB	11,2	21	
				21,3	
	8	PB	7,8	9,2	
				9,7	
	9	PB	12,5	28,4	
				29,3	
	10	PB	15,1	29,3	
				30,1	
	11	PB	14,1	27,6	
				28,4	
	12	PB	6,3	6,5	
				6,8	
	13	PB	12,2	28,5	
				29,4	
	14	PB	12,2	24,5	
				24	
	15	PM	13	17,4	0,55
				17,4	
14	1	PB	10,9	26,2	
				26,2	
	2	PB	14	31	
				29	
	3	PB	9,5	16,6	
				16	
	4	PB	14,6	26,4	
				25,8	
	5	PB	6,5	10	
				10	
	6	PB	11,9	18,8	
				16,1	
15	1	PM	17,6		1,74
	2	PM	19,9		2,30
	3	PM	20		1,80

<i>Parcela</i>	<i>Nº da árvore</i>	<i>Espécies de árvore</i>	<i>Altura total (m)</i>	<i>Diâmetros Altura de Peito (cm)</i>	<i>Perímetro Altura de Peito (m)</i>
	4	PM	15,5		1,38
	5	PM	18,7		1,40
16	1	PB	14,8	36	
				34,5	
	2	PB	11,8	20,2	
				21	
	3	PB	4,8	7	
				7	
	4	PB	17,4	25,2	
				25,4	
	5	PB	10,3	18	
				18,6	
	6	PB	9,1	20,2	
				21	
	7	PB	14,9	24	
				23	
	8	PB	5,7	13	
				11,5	
17	1	PB	15,3	31,4	
				30	
	2	PB	19	33,2	
				34,4	
	3	PB	6,1	12,5	
				13,2	
	4	PB	20,9	41	
				38,5	

ANEXO D - Valores da biomassa discriminados por espécie e parcelas

Parcelas de amostragem																		
Biomassa (kg por parcela)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Biomassa total por espécie (kg)
<i>Pinus pinaster</i>	2 494,49	3 134,68	962,67	2 581,23	0	4 527,53	1 956,22	1 062,09	3 216,21	798,74	5 270,78	1 189,61	2 002,68	919,89	0	1 261,9	1 645,82	33 023,72
<i>Pinus pinea</i>	289	47,07	97,27	20,28	21 696,1	0	0	47,87	0	0	0	0	127,11	0	10 173,28	0	0	32 497,98
<i>Quercus suber</i>	0	0	13,58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13,58
Biomassa total por parcela (kg)	2 783,49	3 181,75	1 073,52	2 601,5	21 696,1	4 527,53	1 956,22	1 109,96	3 216,21	798,74	5 270,78	1 189,61	2 129,79	919,89	10 173,28	1 261,09	1 645,82	65 535,28

